

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 2 年 1 0 月 2 3 日
Date of Application:

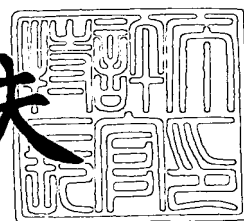
出 願 番 号 特 願 2 0 0 2 - 3 0 8 1 7 1
Application Number:
[ST. 10/C]: [J P 2 0 0 2 - 3 0 8 1 7 1]

出 願 人 ス タ ン レ ー 電 気 株 式 有 限 公 司
Applicant(s):

2 0 0 3 年 7 月 2 4 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今 井 康 夫



出証番号 出証特 2 0 0 3 - 3 0 5 8 7 1 9

【書類名】 特許願

【整理番号】 DS3070

【提出日】 平成14年10月23日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H01L 33/00

【発明の名称】 半導体発光装置

【請求項の数】 12

【発明者】

【住所又は居所】 東京都目黒区中目黒 2-9-13 スタンレー電気株式会社
社内

【氏名】 笹倉 賢

【発明者】

【住所又は居所】 東京都目黒区中目黒 2-9-13 スタンレー電気株式会社
社内

【氏名】 富田 尚太郎

【発明者】

【住所又は居所】 東京都目黒区中目黒 2-9-13 スタンレー電気株式会社
社内

【氏名】 富吉 俊夫

【発明者】

【住所又は居所】 東京都目黒区中目黒 2-9-13 スタンレー電気株式会社
社内

【氏名】 川口 恵蔵

【発明者】

【住所又は居所】 東京都目黒区中目黒 2-9-13 スタンレー電気株式会社
社内

【氏名】 石井 和久

【特許出願人】

【識別番号】 000002303
【氏名又は名称】 スタンレー電気株式会社
【代表者】 北野 隆典

【代理人】

【識別番号】 100091340
【弁理士】
【氏名又は名称】 高橋 敬四郎
【電話番号】 03-3832-8095

【選任した代理人】

【識別番号】 100105887
【弁理士】
【氏名又は名称】 来山 幹雄
【電話番号】 03-3832-8095

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 009852
【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1
【物件名】 図面 1
【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9913038

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書
【発明の名称】 半導体発光装置
【特許請求の範囲】

【請求項 1】 III-V 族化合物半導体で形成され、(100) 面、または (100) 面からの傾斜角度が 2° 以下の結晶面を主面とする支持基板と、

前記支持基板の主面上に配置された発光積層構造であって、In を含む III-V 族混晶半導体からなる量子井戸層、該量子井戸層を挟み、該量子井戸層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一対のキャリア閉込層、該量子井戸層と一対のキャリア閉込層との 3 層を挟み、該キャリア閉込層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一対のクラッド層とを含み、該キャリア閉込層の伝導帯下端のエネルギー準位と、該量子井戸層内の電子の基底準位との差が 100 meV 以上になるように、前記量子井戸層と前記キャリア閉込層の材料、及び前記量子井戸層の厚さが選択されている前記発光積層構造と、

前記発光積層構造にキャリアを注入するための電極とを有する半導体発光装置。

【請求項 2】 前記支持基板が GaAs で形成されており、前記量子井戸層が InGaAs で形成されている請求項 1 に記載の半導体発光装置。

【請求項 3】 前記量子井戸層の In 組成比が 0.12 以下である請求項 1 または 2 に記載の半導体発光装置。

【請求項 4】 III-V 族化合物半導体で形成され、(100) 面、または (100) 面からの傾斜角度が 0.2° 以下の結晶面を主面とする支持基板と、

前記支持基板の主面上に配置された発光積層構造であって、In を含む III-V 族混晶半導体からなる量子井戸層、該量子井戸層を挟み、該量子井戸層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一対のキャリア閉込層、該量子井戸層と一対のキャリア閉込層との 3 層を挟み、該キャリア閉込層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一対のクラッド層とを含み、該キャリア閉込層の伝導帯下端のエネルギー準位と、該量子井戸層内の電子の基底準位との差が 100 meV 以上になるように、前記量子井戸層と前記キャリア閉込層の材料、及

び前記量子井戸層の厚さが選択されている前記発光積層構造と、

前記発光積層構造にキャリアを注入するための電極と
を有する半導体発光装置。

【請求項5】 前記支持基板がGaAsで形成されており、前記量子井戸層がInGaAsで形成されており、前記量子井戸層のIn組成比が0.25以下である請求項4に記載の半導体発光装置。

【請求項6】 III-V族化合物半導体で形成され、(100)面、または(100)面からの傾斜角度が 2° 以下の結晶面を主面とする支持基板と、

前記支持基板の主面上に配置された発光積層構造であって、Inを含むIII-V族混晶半導体からなる量子井戸層、該量子井戸層を挟み、該量子井戸層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一対のキャリア閉込層、該量子井戸層と一対のキャリア閉込層との3層を挟み、該キャリア閉込層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一対のクラッド層とを含み、前記発光積層構造に電流を注入したときに、該量子井戸層で電子と正孔との発光再結合が生じ、前記キャリア閉込層では発光再結合が起こらないように、前記量子井戸層と前記キャリア閉込層の材料、及び前記量子井戸層と前記キャリア閉込層の厚さが選択されている前記発光積層構造と、

前記発光積層構造にキャリアを注入するための電極と
を有する半導体発光装置。

【請求項7】 前記支持基板がGaAsで形成されており、前記量子井戸層がInGaAsで形成されている請求項6に記載の半導体発光装置。

【請求項8】 前記量子井戸層のIn組成比が0.12以下である請求項6または7に記載の半導体発光装置。

【請求項9】 III-V族化合物半導体で形成され、(100)面、または(100)面からの傾斜角度が 0.2° 以下の結晶面を主面とする支持基板と、

前記支持基板の主面上に配置された発光積層構造であって、Inを含むIII-V族混晶半導体からなる量子井戸層、該量子井戸層を挟み、該量子井戸層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一対のキャリア閉込層、該量子井

戸層と一对のキャリア閉込層との3層を挟み、該キャリア閉込層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一对のクラッド層とを含み、前記発光積層構造に電流を注入したときに、該量子井戸層で電子と正孔との発光再結合が生じ、前記キャリア閉込層では発光再結合が起こらないように、前記量子井戸層と前記キャリア閉込層の材料、及び前記量子井戸層と前記キャリア閉込層の厚さが選択されている前記発光積層構造と、

前記発光積層構造にキャリアを注入するための電極とを有する半導体発光装置。

【請求項10】 前記支持基板がGaAsで形成されており、前記量子井戸層がInGaAsで形成されており、前記量子井戸層のIn組成比が0.25以下である請求項9に記載の半導体発光装置。

【請求項11】 III-V族化合物半導体で形成され、(100)面、または(100)面からの傾斜角度が5°以下の結晶面を主面とする支持基板と、

前記支持基板の主面上に配置された発光積層構造であって、Inを含み、その組成比が0.12以下であるIII-V族混晶半導体からなる量子井戸層、該量子井戸層を挟み、該量子井戸層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一对のキャリア閉込層、該量子井戸層と一对のキャリア閉込層との3層を挟み、該キャリア閉込層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一对のクラッド層とを含み、該キャリア閉込層の伝導帯下端のエネルギー準位と、該量子井戸層内の電子の基底準位との差が100meV以上になるように、前記量子井戸層と前記キャリア閉込層の材料、及び前記量子井戸層の厚さが選択されている前記発光積層構造と、

前記発光積層構造にキャリアを注入するための電極とを有する半導体発光装置。

【請求項12】 III-V族化合物半導体で形成され、(100)面、または(100)面からの傾斜角度が5°以下の結晶面を主面とする支持基板と、

前記支持基板の主面上に配置された発光積層構造であって、Inを含み、その組成比が0.12以下であるIII-V族混晶半導体からなる量子井戸層、該量子井戸層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一对のキャリア閉込

層、該量子井戸層と一対のキャリア閉込層との3層を挟み、該キャリア閉込層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一対のクラッド層とを含み、前記発光積層構造に電流を注入したときに、該量子井戸層で電子と正孔との発光再結合が生じ、前記キャリア閉込層では発光再結合が起こらないように、前記量子井戸層と前記キャリア閉込層の材料、及び前記量子井戸層と前記キャリア閉込層の厚さが選択されている前記発光積層構造と、

前記発光積層構造にキャリアを注入するための電極とを有する半導体発光装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、半導体発光装置に関し、特にシリコンを用いたフォトダイオードの受光感度が高い波長領域の光の発光に適し、発光出力と遮断周波数との双方を高めることが可能な半導体発光装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

シリコンを用いたフォトダイオードの受光感度が高い赤外波長領域（波長920nm以下の赤外領域）の光を出力する素子として、ZnドープのGaAs層をAlGaAs層で挟んだダブルヘテロ型発光ダイオードが知られている。このGaAs層のZn濃度を高めることにより、発光ダイオードの遮断周波数を高めることができる。ところが、Zn濃度を高めると、発光出力が極端に低下してしまう。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】

本発明の目的は、シリコンを用いたフォトダイオードの受光感度が高い赤外波長領域の光の発光に適し、かつ発光出力の低下を伴うことなく遮断周波数の向上を図ることが可能な半導体発光装置を提供することである。

【0004】

【課題を解決するための手段】

本発明の一観点によると、III-V族化合物半導体で形成され、(100)面、または(100)面からの傾斜角度が 2° 以下の結晶面を主面とする支持基板と、前記支持基板の主面上に配置された発光積層構造であって、Inを含むIII-V族混晶半導体からなる量子井戸層、該量子井戸層を挟み、該量子井戸層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一対のキャリア閉込層、該量子井戸層と一対のキャリア閉込層との3層を挟み、該キャリア閉込層よりもバンドギャップの大きな半導体材料からなる一対のクラッド層とを含み、該キャリア閉込層の伝導帯下端のエネルギー準位と、該量子井戸層内の電子の基底準位との差が100 meV以上になるように、前記量子井戸層と前記キャリア閉込層の材料、及び前記量子井戸層の厚さが選択されている前記発光積層構造と、前記発光積層構造にキャリアを注入するための電極とを有する半導体発光装置が提供される。

【0005】

上記支持基板を用いることにより、その上に形成される各層の品質を高め、発光出力の低下を伴うことなく遮断周波数の向上を図ることが可能になる。

【0006】

【発明の実施の形態】

図1に、本発明の第1の実施例による半導体発光装置の断面図を示す。高濃度層2と低濃度層3との2層から支持基板4が構成されている。支持基板4は、Znがドーピングされたp型の $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ で形成されている。高濃度層2のZn濃度は $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であり、低濃度層3のZn濃度は $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ である。また、高濃度層2の厚さは $40 \mu\text{m}$ であり、低濃度層3の厚さは $110 \mu\text{m}$ である。

【0007】

低濃度層3の表面上に有機金属化学気相成長(MOCVD)により、 AlGaAs バッファ層5から GaAs コンタクト層12までの各層が形成されている。バッファ層5は、Znがドーピングされたp型の $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ で形成され、その厚さは $0.2 \mu\text{m}$ 、そのZn濃度は $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。

【0008】

下部クラッド層 6 は、Zn がドーピングされた p 型の Al_{0.32}Ga_{0.68}As で形成され、その厚さは 0.5 μ m、その Zn 濃度は $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。下部キャリア閉込層 (CCL 層) 7 は、不純物を意図的にドーピングしていない Al_{0.18}Ga_{0.82}As で形成され、その厚さは 2 ~ 190 nm である。なお、下部 CCL 層 7 のバックグラウンド濃度は $5 \times 10^{16} \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であった。

【0009】

歪量子井戸層 8 は、InGaAs で形成され、その厚さは 2.4 ~ 15 nm、In 組成比は 0.12 ~ 0.25 である。上部キャリア閉込層 9 は、不純物を意図的にドーピングしていない Al_{0.18}Ga_{0.82}As で形成され、その厚さは 2 ~ 190 nm である。なお、上部キャリア閉込層 9 のバックグラウンド濃度は $5 \times 10^{16} \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であった。上部クラッド層 10 は、Si がドーピングされた n 型の Al_{0.32}Ga_{0.68}As で形成され、その厚さは 5.5 μ m、その Si 濃度は $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。

【0010】

電流拡散層 11 は、Si がドーピングされた n 型の Al_{0.18}Ga_{0.82}As で形成され、その厚さは 4.5 μ m、その Si 濃度は $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。コンタクト層 12 は、Si がドーピングされた n 型の GaAs で形成され、その厚さは 0.1 μ m、その Si 濃度は $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。

【0011】

コンタクト層 12 の上に、下から順番に Ni 層、Ge 層、及び Au 層が積層された n 側電極 15 が形成されている。n 側電極 15 は、リフトオフ法により例えば X 字状の平面形状とされる。支持層 4 の一部を構成する高濃度層 2 の表面上に、支持層 4 側から順番に Au 層と AuZn 合金層とが積層された p 側電極 16 が形成されている。p 側電極 16 は、リフトオフ法により例えばハニカム形状とされる。

【0012】

次に、図 2 を参照して、第 1 の実施例による半導体発光装置に用いられている下地基板 4 の製造方法について説明する。

【0013】

図2 (A) に示したGaAsからなる仮の基板1を準備する。仮の基板1の主面は、GaAsの(100)面である。また、仮の基板1にはZnがドーピングされてp型導電性が付与されており、その濃度は $2 \sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ である。

【0014】

仮の基板1の主面上に、液相エピタキシャル成長(LPE)により、Al_{0.26}Ga_{0.74}Asからなる厚さ $40 \mu\text{m}$ の高濃度層2及び厚さ $150 \mu\text{m}$ の低濃度層3を順番に成長させる。この2層が支持基板4となる。LPEには、主として温度差法と徐冷法があるが、ここでは、温度差法を採用する。温度差法を採用することにより、支持基板4のAl組成比をほぼ均一にすることができる。成長装置として、例えばスライドボート型のものを用いることができる。高濃度層2及び低濃度層3には、それぞれZn濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 及び $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ になるように、成長中にZnがドーピングされる。

【0015】

用いた成長用溶液は、Ga溶媒中にGaAs、Al及びZnを溶解させたものである。メルト槽内に満たされた成長用溶液の上下方向の温度勾配は、約 $5^\circ\text{C}/\text{cm}$ であり、種結晶が接触する成長用溶液下部の温度が $830 \sim 850^\circ\text{C}$ である。なお、成長用溶液下部の温度及び温度勾配は、成長中ほぼ一定に保持される。

【0016】

図2 (B) に示す状態に至るまでの工程を説明する。図1に示したGaAs仮の基板1をエッチングして除去する。これにより、支持基板4のみが残る。GaAsからなる仮の基板1は、アンモニア水と過酸化水素水とを体積比で20:1に混合したエッチング液を用いてエッチングすることができる。なお、アンモニア水の濃度は28重量%であり、過酸化水素水の濃度は31重量%である。

【0017】

次に、低濃度層3の表面を研削し、凹凸を少なくする。さらに、研削された表面を研磨して加工ダメージを除去した後、化学機械研磨(CMP)による最終仕上げを行う。一般に、温度差法で成長させた半導体層は、徐冷法で成長させた半導体に比べて、表面の平坦性が悪い。CMPによる最終仕上げを行うことにより、表面の平坦性を高めることができる。ここまでの工程で、支持基板4が得られ

る。

【0018】

n側電極15とp側電極16との間に順方向バイアスを印加し、歪み量子井戸層8にキャリアを注入することにより、赤外領域（波長800～920nm）の発光を生じさせることができる。

【0019】

第1の実施例による半導体装置では、AlGaAsからなる支持基板4が、物理的支持力を有する基板となるとともに、MOCVDの種結晶となる。基板材料としてGaAsを用いていないため、図1に示したコンタクト層12側からのみならず、支持基板4側からも光を取り出すことができる。なお、GaAsからなるコンタクト層12は、後のチップ化工程における酸処理で除去されるため、光取り出しの障害にはならない。歪量子井戸層8の発光スペクトルのピークを与える波長が、仮の基板1を形成する半導体材料のバンドギャップに相当する波長よりも短い場合に、特に、仮の基板1を除去する効果が高い。

【0020】

また、下部キャリア閉込層7、歪量子井戸層8及び上部キャリア閉込層9がMOCVDで形成されている。このため、これらの層をLPEで形成する場合に比べて、膜厚の均一性を高めることができ、高い発光効率を実現することが可能になる。なお、MOCVDの代わりに分子線エピタキシャル成長（MBE）を用いてもよい。

【0021】

次に、第1の実施例による半導体発光装置の発光強度及び動作速度を向上させるための好ましい条件について説明する。

【0022】

図3に、下部クラッド層6から上部クラッド層10までの伝導帯側のエネルギーバンド構造を示す。歪量子井戸層8の厚さを L_z 、歪量子井戸層8内の電子の基底準位を E_{e1} 、歪量子井戸層8の伝導帯下端と基底準位 E_{e1} とのエネルギー差を ΔE_{e1} 、下部及び上部キャリア閉込層7及び9の伝導帯下端と電子の基底準位 E_{e1} との間のエネルギー差を ΔE_b 、下部及び上部キャリア閉込層7及び9の伝

導帯下端と歪量子井戸層 8 の伝導帯下端とのエネルギー差を ΔE_c とする。

【0023】

上部クラッド層 10 から上部キャリア閉込層 9 内に注入された電子は、下部クラッド層 6 と下部キャリア閉込層 7 との界面のポテンシャル障壁 B_1 及び上部クラッド層 10 と上部キャリア閉込層 9 との界面のポテンシャル障壁 B_2 により、下部キャリア閉込層 7 から上部キャリア閉込層 9 までの 3 層の中に閉じ込められる。閉じ込められた電子が歪量子井戸層 8 内の電子の基底準位 E_{e1} に捕捉され、荷電子帯の正孔と再結合することにより、発光が生ずる。

【0024】

キャリア閉込層 7 及び 9 のバンドギャップを狭くして、エネルギー差 ΔE_b を小さくすると、キャリア閉込層 7 及び 9 内でも電子と正孔との再結合による発光が生じてしまう。この発光は、歪量子井戸層 8 内の発光に比べて、応答速度が遅い。発光装置の応答速度を高めるためには、キャリア閉込層 7 及び 9 からの発光を防止する必要がある。

【0025】

また、キャリア閉込層 7 及び 9 のバンドギャップを広くして、エネルギー差 ΔE_b を大きくすると、ポテンシャル障壁 B_1 及び B_2 が低くなる。このため、電子の閉じ込め効果が低くなってしまう。従って、エネルギー差 ΔE_b は、発光効率及び応答速度に大きく影響すると考えられる。

【0026】

以下、エネルギー差 ΔE_b ($=\Delta E_c - \Delta E_{e1}$) の求め方について説明する。歪量子井戸層 8 の伝導帯下端と歪量子井戸層 8 内の第 n 次の準位 E_{en} とのエネルギー差を ΔE_{en} 、歪量子井戸層 8 内の電子の有効質量を m_{e1}^* 、キャリア閉込層 7 及び 9 内の電子の有効質量を m_{e2}^* 、プランク常数を h とすると、次数 n が奇数のとき、以下の式が成立する。なお、キャリア閉込層 7 及び 9 内への電子の波動関数の侵入の深さ（井戸構造に依存するが、数 nm 程度）に比べて、キャリア閉込層 7 及び 9 が十分厚いと仮定している。

【0027】

【数 1】

$$\begin{aligned}
 (\alpha L_z / 2) \tan(\alpha L_z / 2) &= (\beta L_z / 2) (m_{e1}^* / m_{e2}^*) \\
 \alpha^2 &= 2 (m_{e1}^*) \Delta E_{en} / (h / 2\pi)^2 \\
 \beta^2 &= 2 (m_{e2}^*) (\Delta E_c - \Delta E_{en}) / (h / 2\pi)^2 \quad \dots (1)
 \end{aligned}$$

一般に、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ のバンドギャップ E_{g1} は、

【0028】

【数2】

$$E_{g1} = 1.422 - 1.53(1-x) + 0.45(1-x)^2 \quad \dots (2)$$

で与えられ、伝導帯の電子の有効質量 m_{e1}^* は、自由電子の静止質量を m_{e0} として、

【0029】

【数3】

$$m_{e1}^* / m_{e0} = 0.0225(1-x) + 0.0665x \quad \dots (3)$$

で与えられる。なお、式(2)は、歪量子井戸層8の歪量を考慮しないで導出されたものである。

【0030】

InGaAs 井戸層に歪が導入されると、そのエネルギーギャップが変化する。その変化分 ΔE_{g1} 、

【0031】

【数4】

$\Delta E_{g1} = [-2a(C_{11} - C_{12}) / C_{11} + b(C_{11} + 2C_{12}) / C_{11}] \epsilon$ と表される。ここで、 a 及び b は変形ポテンシャル、 C_{11} 及び C_{12} は弾性スティフネス定数、 ϵ は井戸層とキャリア閉込層との格子不整合に伴う弾性歪である。弾性歪 ϵ は、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ の格子定数を A_w 、 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ の格子定数を A_b とすると、下記の式で表される。

【0032】

【数5】

$$\epsilon = (A_w - A_b) / A_b$$

ここで、格子定数 A_w 、 A_b 、変形ポテンシャル a 、 b 及び弾性スティフネス定数 C_{11} 、 C_{12} は、下の式で与えられる。

【0033】

【数6】

$$A_w = 0.56533x + 0.60584(1-x) \quad [\text{nm}]$$

$$A_b = 0.56533(1-z) + 0.015z \quad [\text{nm}]$$

$$a = -5.8(1-x) - 9.8x \quad [\text{eV}]$$

$$b = -1.8(1-x) - 1.76x \quad [\text{eV}]$$

$$C_{11} = 0.833(1-x) + 1.188x \quad [\times 10^{12} \text{dyn/cm}^2]$$

$$C_{12} = 0.432(1-x) + 0.532x \quad [\times 10^{12} \text{dyn/cm}^2]$$

$\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ のバンドギャップ E_{g2} は、

【0034】

【数7】

$$E_{g2} = 1.425 + 1.444z \quad \dots (7)$$

で与えられ、伝導帯の電子の有効質量 m_{e2}^* は、

【0035】

【数8】

$$m_{e2}^*/m_{e0} = 0.0665(1-z) + 0.15z \quad \dots (8)$$

で与えられる。

【0036】

キャリア閉込層7及び9が AlGaAs で形成され、歪量子井戸層8が InGaAs で形成されている場合、両者のバンドギャップ差 ΔE_g は、 $E_{g2} - (E_{g1} + \Delta E_{g1})$ とすることができ、エネルギー差 ΔE_c は、

【0037】

【数9】

$$\Delta E_c = 0.57 \Delta E_g$$

と近似することができる。また、キャリア閉込層7及び9が GaAs で形成され、歪量子井戸層8が InGaAs で形成されている場合には、エネルギー差 ΔE_c は、

【0038】

【数10】

$$\Delta E_c = 0.62 \Delta E_g$$

と近似することができる。また、キャリア閉込層 7 及び 9 が AlGaAs で形成され、歪量子井戸層 8 が GaAs で形成されている場合には、エネルギー差 ΔE_c は、

【0039】

【数11】

$$\Delta E_c = 0.62 \Delta E_g$$

と近似することができる。

【0040】

種々の In 組成比 $(1-x)$ 及び Al 組成比 z の組み合わせで、図 1 に示した半導体発光装置を作製した。各半導体発光装置のエネルギー差 ΔE_b を計算により求め、さらに遮断周波数を実測した。エネルギー差 ΔE_b は、式 (1) 及び $\Delta E_b = \Delta E_c - \Delta E_{e1}$ の関係式から求めることができる。なお、遮断周波数は、下記の方法で実測した。

【0041】

50 mA の順方向直流電流に振幅 10 mA の交流電流を重畳させた電流を、半導体発光装置に流す。交流電流の周波数が f_0 の時の光出力の振幅に対して、光出力の振幅が -3 dB となる周波数を遮断周波数 f_c と呼ぶ。ここで、 $f_0 = (1/100) f_c$ である。

【0042】

図 4 に、エネルギー差 ΔE_b と遮断周波数との関係を示す。横軸は遮断周波数を単位「MHz」で表し、縦軸はエネルギー差 ΔE_b を単位「meV」で表す。図中の菱形記号、丸記号、及び三角記号はそれぞれ歪量子井戸層 8 の厚さが 3 nm、5 nm、及び 15 nm の半導体発光装置を示す。

【0043】

エネルギー差 ΔE_b が小さくなると遮断周波数が低下する。特に、歪量子井戸層 8 の厚さが 5 nm の場合、エネルギー差 ΔE_b が 100 meV の点でグラフの傾きが変わっていることがわかる。なお、歪量子井戸層 8 の厚さが 3 nm 及び 15 nm のいずれの場合にも、エネルギー差 ΔE_b が 100 meV の点でグラフの傾きが

変化する傾向を示している。

【0044】

いずれの場合も、エネルギー差 ΔE_b が 100 meV 以下になると、遮断周波数の低下傾向が速まる。これは、エネルギー差 ΔE_b が小さくなったことにより、キャリア閉込層 7 及び 9 内で電子と正孔との再結合が生じ始めたためと考えられる。

【0045】

図 5 に、キャリア閉込層 ($\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$) 7 及び 9 の Al 組成比 z を異ならせた種々の試料の発光スペクトルを示す。横軸は発光波長を単位「nm」で表し、縦軸は規格化発光強度を表す。規格化発光強度は、最大発光強度を 1 として規格化したものである。図中の曲線 a ~ d は、それぞれ Al 組成比 z が 0.09、0.13、0.18 及び 0.26 の場合の発光スペクトルを示す。なお、いずれの試料も、歪量子井戸層 8 の In 組成比は 0.12、厚さは 5 nm である。また、電流拡散層 11 の Al 組成比を 0.32 とし、これらの発光が電流拡散層 11 で吸収されないようにしている。

【0046】

キャリア閉込層 7 及び 9 の Al 組成比 z が小さくなるに従って、エネルギー差 ΔE_b が小さくなる。また、発光波長が長波長側にシフトする。なお、曲線 a ~ d の試料のエネルギー差 ΔE_b は、それぞれ 80 meV 、 107 meV 、 143 meV 、及び 202 meV である。

【0047】

曲線 a の波長 800 nm 付近及び曲線 b の波長 770 nm 付近にサブピークが観測される。メインピークよりも短波長側にサブピークが観測されることにより、キャリア閉込層 7 及び 9 で発光していることがわかる。エネルギー差 ΔE_b が大きくなると、サブピークが観測されなくなる。従って、高い遮断周波数を得るためには、エネルギー差 ΔE_b を 100 meV 以上とすることが好ましく、さらに、エネルギー差 ΔE_b を 110 meV とすると、サブピークの観測されない高い遮断周波数を有する発光素子を得ることができる。エネルギー差 ΔE_b は、上述の式 (1) に示したように、歪量子井戸層 8 の厚さ及び歪量子井戸層 8 とキャリア閉込

層 7 及び 9 の半導体材料が決まれば、ほぼ特定することができる。

【0048】

図 6 に、歪量子井戸層 8 の厚さと遮断周波数との関係を、エネルギー差 ΔE_b と対比させながら示す。横軸は歪量子井戸層 8 の厚さを単位「nm」で表し、左縦軸は遮断周波数を単位「MHz」で表し、右縦軸はエネルギー差 ΔE_b を単位「meV」で表す。評価対象試料は、歪量子井戸層 8 の厚さが 5 nm、10 nm、及び 15 nm の 3 種類である。いずれの試料も、歪量子井戸層 8 の In 組成比は 0.12 であり、キャリア閉込層 7 及び 9 の Al 組成比は 0.18 である。

【0049】

図 6 中の四角記号はエネルギー差 ΔE_b を示す。また、三角記号及び菱形記号は、それぞれバイアス電流を 100 mA 及び 50 mA とした場合の遮断周波数を示す。なお、各試料は、一辺の長さが 300 μ m の正形状である。

【0050】

歪量子井戸層 8 を厚くすると、エネルギー差 ΔE_b が大きくなるにも関わらず、遮断周波数は低下してしまう。例えば、NRZ 通信方式で 100 Mbps の通信速度を実現するためには、遮断周波数を約 70 MHz 以上にしなければならない。歪量子井戸層 8 の厚さが 15 nm 以下であれば、バイアス電流を 100 mA とすることにより、遮断周波数を 70 MHz 以上にすることが可能である。

【0051】

図 7 に、歪量子井戸層 8 の 5 種類の In 組成比 (1-x) について、歪量子井戸層 8 の厚さと発光波長との関係を示す。横軸は歪量子井戸層 8 の厚さを単位「nm」で表し、縦軸は発光波長を単位「nm」で表す。図中の実線に付された数値が、In 組成比である。なお、キャリア閉込層 7 及び 9 の Al の組成比 z は 0.18 である。

【0052】

歪量子井戸層 8 の In 組成比を大きくすると発光波長が長くなり、歪量子井戸層 8 を厚くしても発光波長が長くなることがわかる。シリコンを用いたフォトダイオードで受光するためには、発光波長を 800 nm～920 nm とすることが好ましい。歪量子井戸層 8 の In 組成比を 0.25 よりも大きくして、発光波長

を 800 nm ~ 920 nm とするためには、歪量子井戸層 8 を約 3 nm よりも薄くしなければならない。このような薄い歪量子井戸層を再現性よく形成するのは困難である。また、In 組成比が大きい場合には、発光波長が 800 ~ 920 nm の範囲でグラフの傾きが急であるため、歪量子井戸層 8 の膜厚のわずかなばらつきで発光波長が大きく変動してしまう。従って、歪量子井戸層 8 の In 組成比を 0.25 以下とすることが好ましい。

【0053】

In 組成比を小さくすると、歪量子井戸層 8 を比較的厚くしても、波長 800 nm ~ 920 nm の発光を得ることができるであろう。ところが、歪量子井戸層 8 を厚くし、その In 組成比を小さくすると、図 6 で説明したように、遮断周波数が低下してしまう。

【0054】

図 8 に、遮断周波数とエネルギー差 ΔE_b との関係を示す。横軸は遮断周波数を単位「MHz」で表し、縦軸はエネルギー差 ΔE_b を単位「meV」で表す。図中の菱形記号は In 組成比を 0.12 とした歪量子井戸層を用いた場合、四角記号は GaAs 井戸層を用いた場合を示す。エネルギー差 ΔE_b が増大するに従って、InGaAs 歪量子井戸層を用いた場合の遮断周波数が高くなることがわかる。また、歪量子井戸層に GaAs を用いる場合よりも、InGaAs を用いた方が、高い遮断周波数を得ることができる。従って、遮断周波数を高く維持するためには、歪量子井戸層 8 として $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ ($0 < x < 1$) を用いることが好ましく、さらに In 組成比を 0.05 以上とすることがより好ましい。

【0055】

図 9 に、キャリア閉込層 7 及び 9 の Al 組成比を異ならせた複数の試料について、遮断周波数とバイアス電流との関係を示す。横軸はバイアス電流を単位「mA」で表し、縦軸は遮断周波数を単位「MHz」で表す。図中の曲線 a ~ d は、それぞれ Al 組成比が 0.09、0.13、0.18、及び 0.26 の場合の遮断周波数を示す。なお、歪量子井戸層 8 の In 組成比は 0.12 であり、その厚さは 5 nm である。Al 組成比が 0.09 及び 0.13 の場合には、バイアス電流が 100 mA 付近ではば最大値を示し、バイアス電流をそれ以上増加させても

遮断周波数は高くなり飽和する。A1組成比を0.13より大きくすれば、バイアス電流を増加させたときに遮断周波数が飽和しにくいことがわかる。また、バイアス電流を40mA以上にすれば、A1組成比が0.13以上の条件で70MHz以上の遮断周波数を得ることが可能である。

【0056】

図10に、キャリア閉込層7及び9のA1組成比を異ならせた複数の試料について、バイアス電流と発光出力との関係を、規格化微分量子効率と対比させながら示す。横軸はバイアス電流を単位「mA」で表し、左縦軸は発光出力を単位「mW」で表し、右縦軸は規格化微分量子効率を表す。なお、この場合の微分量子効率とは、上記バイアス電流(I)と発光出力(p)との関係を表したグラフにおいて隣接する測定ポイントを結ぶ直線の傾きを意味し、下記の式から求めた。

【0057】

【数12】

$$(dp/dI)_n = (p_n - p_{n-1}) / (I_n - I_{n-1})$$

ここで、nは1から測定ポイント数までの整数である。

【0058】

また、規格化微分量子効率は、微分量子効率の最大値を1として規格化したものである。図中の実線a～eは、それぞれキャリア閉込層7及び9のA1組成比が0.09、0.13、0.18、0.26、及び0.32の場合の発光出力を示し、点線a'～e'は、それぞれキャリア閉込層7及び9のA1組成比が0.09、0.13、0.18、0.26、及び0.32の場合の規格化微分量子効率を示す。

【0059】

バイアス電流が増加するに従って、発光出力も増加し、その傾きに相当する規格化微分量子効率は小さくなっている。また、A1組成比を小さくすると、光出力が増大する傾向を示し、規格化微分量子効率も大きくなる。A1組成比がクラッド層のA1組成比と同じ0.32の場合には、規格化微分量子効率の急激な低下が観測され、バイアス電流を150mAより大きくしても発光出力の増加率は小さい。これは、図3に示したポテンシャル障壁B₁及びB₂が低くなり、キャリ

ア閉込効果が低下したためと考えられる。

【0060】

図10から、十分な出力を得るために、キャリア閉込層7及び9のA1組成比をクラッドのA1組成比未満とすることが好ましいと思われる。特に光通信に用いる赤外発光素子の場合には、通信速度の高速化と通信可能距離の長距離化のために、高い遮断周波数と大きな発光出力が要求される。より大きな発光出力を得るために、通信用の発光素子は、一般照明で使用される可視光LEDでは使用されないような200mA以上の大電流で使用されることが多い。このような大電流を流しても安定して高い規格化微分量子効率を示すようにするために、A1組成比を0.26未満とすることが好ましい。このとき、キャリア閉込層7及び9（A1組成比0.26）とクラッド層（A1組成比0.32）とのバンドギャップ差 ΔE_g は84meVである。 $\Delta E_c = 0.65 \Delta E_g$ の関係式を用いれば、ポテンシャル障壁 B_1 及び B_2 の高さは、55meVである。すなわち、クラッド層とキャリア閉込層との界面のポテンシャル障壁の高さを55meV以上にするのが好ましい。

【0061】

図11に、キャリア閉込層7及び8の厚さを異ならせた複数の試料について、バイアス電流と遮断周波数との関係を示す。横軸はバイアス電流を単位「mA」で表し、縦軸は遮断周波数を単位「MHz」で表す。図中の曲線a～cは、キャリア閉込層7及び9の厚さを、それぞれ30nm、50nm、及び120nmとした場合を示す。バイアス電流を増加させると遮断周波数が高くなるが、キャリア閉込層7及び9の厚さを120nmとした場合には、バイアス電流が100mA以上で飽和することがわかる。従って、キャリア閉込層7及び9の厚さを120nm未満とすることが好ましい。また、十分なキャリア閉込効果を発揮するためには、キャリア閉込層7及び9の厚さを10nm以上とすることが好ましい。

【0062】

上記半導体装置では、図1に示したように、歪量子井戸層8の層数を1としたが、2層以上としてもよい。

【0063】

図12に、歪量子井戸層の数を1、2、3、5、及び10とした試料について、バイアス電流と遮断周波数との関係を示す。横軸はバイアス電流を単位「mA」で表し、縦軸は遮断周波数を表す。各試料の歪量子井戸層の厚さは5 nm、In組成比は0.12であり、キャリア閉込層の厚さは50 nm、Al組成比は0.18である。また、歪量子井戸層を複数とした場合の、井戸層間に配置する障壁層の厚さは10 nmであり、そのAl組成比はキャリア閉込層のAl組成比と同一である。なお、チップサイズは400 μ m \times 400 μ mである。

【0064】

歪量子井戸層の数が少ないほど規格化遮断周波数が高くなることがわかる。なお、バイアス電流を増加させると、光出力はある強度で飽和する。歪量子井戸層の数を増やすと、光出力の飽和値を高くすることができる。従って、歪量子井戸層の数は、必要とされる遮断周波数及び光出力の観点から選択されるべきである。100 Mbpsの伝送速度速度を達成するために遮断周波数を70 MHz程度とするためには、歪量子井戸層の数を1または2とすることが好ましい。

【0065】

図13に、従来の発光ダイオードと第1の実施例による半導体発光装置（発光ダイオード）との、遮断周波数と発光出力との分布を示す。横軸は遮断周波数を単位「MHz」で表し、縦軸は発光出力を単位「mW」で表す。図中の丸記号は、第1の実施例の発光ダイオードに対応し、三角記号は、歪量子井戸層としてZnドープのGaAsを用い、キャリア閉込層としてAlGaAsを用いた従来の発光ダイオードに対応する。

【0066】

従来の発光ダイオードでは、歪量子井戸層のZn濃度を高めるに従って遮断周波数を高めることができるが、遮断周波数が上昇するに従って発光出力が低下してしまう。また、遮断周波数を60 MHz以上にすることは困難であった。これに対し、第1の実施例の発光ダイオードでは、遮断周波数を60 MHz以上とすることが可能であり、かつ遮断周波数を高くしても発光出力が低下しない。

【0067】

次に、本発明の第2の実施例について説明する。InGaAs歪量子井戸層を

用いた半導体発光装置の遮断周波数の向上は、例えば歪量子井戸層の In の組成比を高めることにより実現される。しかし、(100) 面から傾斜した面を主面とする GaAs 基板上に、In 組成比が大きく、かつ良質な InGaAs 歪量子井戸層をエピタキシャル成長させることは困難である。特に、In 組成比が 0.12 よりも大きくなると、良質な InGaAs 層の形成が困難になり、In 組成比が 0.18 よりも大きくなると、極めて困難になる。以下の第 2～第 4 の実施例では、良質な InGaAs 歪量子井戸層を形成する条件を規定するための種々の評価を行った。

【0068】

第 2 の実施例では、GaAs 基板上に形成された InGaAs 歪量子井戸層と GaAs 障壁層との界面の組成変化の急峻性について評価した。

【0069】

図 14 に、評価用試料の断面図を示す。GaAs 基板 20 の主面上に、MOCVD により厚さ $0.2\ \mu\text{m}$ の GaAs バッファ層 21 が形成されている。バッファ層 21 の上に、厚さ $10\ \text{nm}$ の InGaAs 歪量子井戸層 22 と厚さ $20\ \text{nm}$ の GaAs 障壁層 23 との 2 層構造が 5 周期分積層されている。

【0070】

成長温度、歪量子井戸層 22 の In 組成比、及び GaAs 基板 20 の主面の結晶面方位の異なる複数の試料を作製した。成長温度は、 620°C 、 650°C 、 700°C のいずれである。歪量子井戸層 22 の In 組成比は、0.12 または 0.18 である。GaAs 基板 20 の主面は、(100) ジャスト面、(100) 面から (111) A 面に向かって ((111) A 面に近づくように) 2° 、 5° または 10° 傾斜した面、(100) 面から (110) 面に向かって 2° または 5° 傾斜した面のいずれかである。なお、本明細書において「(100) ジャスト面」とは、(100) 面からの傾斜角が 0.2° 以下の面を意味する。

【0071】

図 15 に、各試料の歪量子井戸層 22 と障壁層 23 との積層構造の (400) 面に対応する X 線ロッキングカーブのサテライトピークの半値幅の測定結果を示す。図 15 の横軸は、歪量子井戸層 22 と障壁層 23 との成長温度を単位「 $^\circ\text{C}$ 」

で表し、縦軸は、半値幅を単位「arc sec」で表す。図中の黒四角は、(100) ジャスト面を主面とする基板を用いた試料を示す。黒菱形、黒三角、及びバツ印は、それぞれ(100)面から(111)A面に向かって 2° 、 5° 、及び 10° 傾斜させた面を主面とする基板を用いた試料を示す。白菱形及び白三角は、それぞれ(100)面から(110)面に向かって 2° 及び 5° 傾斜させた面を主面とする基板を用いた試料を示す。なお、上記試料の歪量子井戸層22のIn組成比は0.12である。プラス記号は、(100) ジャスト面を主面とする基板を用い、歪量子井戸層22のIn組成比を0.18にした試料を示す。

【0072】

(100) ジャスト面のGaAs基板を用い、歪量子井戸層22のIn組成比を0.12にした場合には、成長温度によらず半値幅が120 arc sec以下になり、結晶品質の高い積層構造が得られている。基板の主面の、(100)面からの傾斜角が大きくなると、半値幅が大きくなる傾向にあり、成長温度が700℃のときに、この傾向が顕著である。特に、(100)面からの傾斜角が 5° 以上になると、半値幅が急激に大きくなる。

【0073】

また、歪量子井戸層22のIn組成比が0.18の試料は、組成比が0.12の試料に比べて、半値幅が著しく大きい。

【0074】

図16 (A) 及び (B) に、成長温度を700℃とした試料のX線ロックングカーブを示す。実線a、b、c、及びdは、それぞれ基板の主面が(100) ジャスト面、(100)面から(111)A面に向かって 2° 傾斜した面、(100)面から(111)A面に向かって 5° 傾斜した面、及び(100)面から(110)面に向かって 2° 傾斜した面である試料を示す。図16 (A) の各試料は、歪量子井戸層22のIn組成比が0.12のものであり、図16 (B) の各試料は、歪量子井戸層22のIn組成比が0.18のものである。

【0075】

図16 (A) に示すように、歪量子井戸層22のIn組成比が0.12の場合には、4本の実線a～dはほとんど区別できず、いずれの場合も明確なサテライ

トピークが現れている。図16(B)に示すように、歪量子井戸層22のIn組成比が0.18の場合には、(100)ジャスト面以外の基板を用いた試料では、明確なサテライトピークが観測されない。

【0076】

半導体発光装置のクラッド層やキャリア閉込層にAlGaAsを用いる場合、MOCVDによるAlGaAsの好適な成長温度は700℃～750℃である。成長温度を700℃よりも低くすると、歪量子井戸層と障壁層との界面の酸素濃度が増加し、素子特性が低下する。このため、AlGaAs歪量子井戸層の成長温度を700℃よりも低くすることは好ましくない。

【0077】

InGaAsの成長温度を700℃以上にする場合には、図15の測定結果からわかるように、GaAs基板の主面を(100)ジャスト面にするか、または(100)面からの傾斜角が2°以下の面とすることが好ましい。なお、この場合、歪量子井戸層のIn組成比を0.12以下にすることが好ましい。

【0078】

次に、本発明の第3の実施例について説明する。第3の実施例では、GaAs基板上に形成されたInGaAs歪量子井戸層を有する複数の試料を作製し、フォトルミネッセンス(PL)スペクトルの評価を行った。

【0079】

図17に、第3の実施例で作製した試料の断面図を示す。GaAs基板30の主面上に、厚さ0.2μmのGaAsバッファ層31が形成されている。その上に、下側クラッド層32、下側キャリア閉込層33、歪量子井戸層34、上側キャリア閉込層35、上側クラッド層36、及びキャップ層37がこの順番に積層されている。これらの層はMOCVDにより、成長温度650℃で形成した。

【0080】

下側クラッド層32及び上側クラッド層36は、共にAl_{0.39}Ga_{0.61}Asで形成され、その厚さはそれぞれ1μm及び150nmである。下側キャリア閉込層33及び上側キャリア閉込層35は、共にAl_{0.26}Ga_{0.74}Asで形成され、その各々の厚さは50nmである。歪量子井戸層34はInGaAsで形成され

、その組成比及び厚さは試料によって異なる。キャップ層 37 は GaAs で形成され、その厚さは 50 nm である。

【0081】

図 18 に、第 3 の実施例で作製した試料 A～L の各々の InGaAs 歪量子井戸層の In 組成比と厚さ、及び基板の主面の面方位を示す。

【0082】

図 19 及び図 20 に、それぞれ試料 A～F の PL スペクトル、及び試料 G～L の PL スペクトルを示す。横軸は波長を単位「nm」で表し、縦軸は PL 強度を任意単位で表す。いずれの試料においても、第 1 次量子準位のキャリアの再結合に対応する発光が観測されている。

【0083】

ところが、歪量子井戸層 34 の厚さを 10 nm 以上にし、In 組成比を 0.18 にし、(100) 面から傾斜した面を主面とする基板を用いた試料 H、I、K、及び L の PL 強度が、In 組成比を 0.12 にし、その他の条件を同じにした試料 B、C、E、及び F の PL 強度に比べて極めて弱いことがわかる。従って、歪量子井戸層 34 の In 組成比を 0.12 よりも大きくする場合には、(100) ジャスト面の GaAs 基板を用いることが好ましい。

【0084】

次に、本発明の第 4 の実施例について説明する。第 4 の実施例では、GaAs 基板上に形成された InGaAs 歪量子井戸層を有する複数の試料（発光ダイオード）を作製し、エレクトロルミネッセンス（EL）スペクトルの評価を行った。

【0085】

図 21 に、第 4 の実施例で作製した試料の断面図を示す。Zn がドーパされた GaAs 基板 40 の主面上に、Zn がドーパされた厚さ 0.2 μ m の GaAs バッファ層 41 が形成されている。その上に、下側クラッド層 42、下側キャリア閉込層 43、歪量子井戸層 44、上側キャリア閉込層 45、上側クラッド層 46、電流拡散層 47、及びコンタクト層 48 がこの順番に積層されている。これらの層は、成長温度を 700℃とした MOCVD により形成される。

【0086】

下側クラッド層 42 は Zn がドーピングされた $\text{Al}_{0.39}\text{Ga}_{0.61}\text{As}$ で形成され、その厚さは $1\ \mu\text{m}$ である。下側キャリア閉込層 43 及び上側キャリア閉込層 45 は、共に $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ で形成され、その各々の厚さは $50\ \text{nm}$ である。歪量子井戸層 44 は InGaAs で形成され、その組成比及び厚さは試料によって異なる。上側クラッド層 46 は、Si がドーピングされた $\text{Al}_{0.39}\text{Ga}_{0.61}\text{As}$ で形成され、その厚さは $1\ \mu\text{m}$ である。電流拡散層 47 は、Si がドーピングされた $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ で形成され、その厚さは $4.5\ \mu\text{m}$ である。コンタクト層 48 は、Si がドーピングされた GaAs で形成され、その厚さは $50\ \text{nm}$ である。

【0087】

コンタクト層 48 の表面上に上側電極 49 が形成されている。上側電極 49 は、Ge 膜と Au 膜とを蒸着した後、合金化処理することにより形成される。基板 40 の背面上に AuZn 合金からなる下側電極 50 が形成されている。

【0088】

上述の積層構造を形成した後、ダイシング工程、ボンディング工程を経て、ステム上にマウントすることにより、発光ダイオードが完成する。

【0089】

図 22 に、第 4 の実施例で作製した試料 W~Z の、基板の主面の面方位、歪量子井戸層 44 の In 組成比と厚さ、EL 強度、EL スペクトルの半値幅、及び遮断周波数を示す。

【0090】

図 23 に、試料 W~Z に $50\ \text{mA}$ の電流を流した時の規格化 EL 強度のスペクトルを示す。横軸は波長を単位「nm」で表し、縦軸は規格化 EL 強度を、最大値を 1 とした相対値で表す。歪量子井戸層 44 の In 組成比が 0.12 の場合には、試料 W 及び X の測定結果からわかるように、(100) 面から 5° 傾斜した主面を有する GaAs 基板を用いても、(100) ジャスト面の基板を用いた場合とほぼ同等の EL 性能が得られる。従って、(100) 面からの傾斜角が 5° 以下であれば、(100) ジャスト面の基板を用いた場合と同等の EL 性能が得られるであろう。

【0091】

歪量子井戸層 44 の In 組成比を 0.25 にすると、試料 Y 及び Z の測定結果からわかるように、(100) 面から傾斜した主面を有する GaAs 基板を用いた場合には、(100) ジャスト面の基板を用いた場合に比べて、EL 出力が低下し、かつスペクトルの半値幅も大きくなる。従って、In 組成比を 0.12 よりも大きくする場合には、(100) ジャスト面の基板を用いることが好ましい。このとき、In 組成比が 0.25 以下であれば、所望の EL 性能が得られるであろう。

【0092】

なお、基板の主面の面方位によって、遮断周波数に有意な差は見られなかった。

【0093】

図 24 に、図 21 に示した構造を有する発光ダイオードの遮断周波数と、歪量子井戸層の In 組成比との関係を示す。横軸は In 組成比を表し、縦軸は遮断周波数を単位「MHz」で表す。In 組成比が増加するに従って、遮断周波数が高くなっていることがわかる。

【0094】

InGaAs 歪量子井戸層を用いた半導体発光装置の遮断周波数を高くするためには、歪量子井戸層の In 組成比を大きくすることが有効である。ところが、上述の実施例のように、(100) 面から傾斜した主面を有する GaAs 基板上に、In 組成比の大きな高品質の InGaAs 層を成長させることは困難である。基板の主面の面方位や量子井戸層の In 組成比を、上記第 2～第 4 の実施例の評価から得られた好ましい条件に適合させることにより、高品質の InGaAs 層を形成することができる。

【0095】

上記第 2～第 4 の実施例では、基板材料を GaAs にしたが、AlGaAs 基板を用いた第 1 の実施例の場合と同様に、半導体発光装置のクラッド層、キャリア閉込層、及び歪量子井戸層の好ましい構成条件を適用することにより、遮断周波数の向上を図ることが可能である。

【0096】

また、上記第2～第4の実施例で説明した好ましい基板の面方位、及び歪量子井戸層のIn組成比は、III-V族化合物半導体（AlGaAs等の混晶半導体を含む）からなる基板を用いる場合にも同様に適用されるであろう。また、上記第2～第4の実施例では、歪量子井戸層をInGaAsで形成したが、InGaAlAs等のInを含むIII-V族混晶半導体を用いる場合にも、好ましい基板の面方位、及び歪量子井戸層のIn組成比が適用可能であろう。

【0097】

以上実施例に沿って本発明を説明したが、本発明はこれらに制限されるものではない。例えば、種々の変更、改良、組み合わせ等が可能なことは当業者に自明であろう。

【0098】**【発明の効果】**

以上説明したように、本発明によれば、歪量子井戸層にInを含む混晶半導体を用い、キャリア閉込層にAlGaAsもしくはGaAs等を用いることにより、発光波長を800nm～920nmとし、かつ発光出力の低下防止と遮断周波数の向上とを両立させることができる。また、支持基板の主面の結晶面方位及び歪量子井戸層のIn組成比を好適な範囲に設定することにより、歪量子井戸層や障壁層の結晶品質を高め、発光特性の向上を図ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の第1の実施例による半導体発光装置の模式的な断面図である。

【図2】 本発明の第1の実施例による半導体発光装置の支持基板の製造方法を説明するための断面図である。

【図3】 第1の実施例による半導体発光装置の下部クラッド層から上部クラッド層までの積層構造の伝導帯側のバンド構造を示す図である。

【図4】 第1の実施例による半導体発光装置のエネルギー差 ΔE_b と遮断周波数との関係を示すグラフである。

【図5】 第1の実施例による半導体発光装置のキャリア閉込層のAl組成

比を異ならせた種々の試料の発光スペクトルを示すグラフである。

【図 6】 第 1 の実施例による半導体発光装置の歪量子井戸層の厚さと遮断周波数との関係を示すグラフである。

【図 7】 第 1 の実施例による半導体発光装置の歪量子井戸層の厚さと発光波長との関係を示すグラフである。

【図 8】 第 1 の実施例による半導体発光装置の遮断周波数とエネルギー差 ΔE_b との関係を示すグラフである。

【図 9】 第 1 の実施例による半導体発光装置のキャリア閉込層の種々の A1 組成比について、バイアス電流と遮断周波数との関係を示すグラフである。

【図 10】 第 1 の実施例による半導体発光装置のキャリア閉込層の種々の A1 組成比について、バイアス電流と規格化光出力との関係を、規格化微分量子効率と対比させながら示すグラフである。

【図 11】 第 1 の実施例による半導体発光装置のキャリア閉込層の種々の厚さについて、バイアス電流と遮断周波数との関係を示すグラフである。

【図 12】 第 1 の実施例による半導体発光装置の量子井戸数を種々異ならせた場合の、バイアス電流と規格化遮断周波数との関係を示すグラフである。

【図 13】 第 1 の実施例による光半導体装置と従来の光半導体装置との、遮断周波数と発光出力との分布を示すグラフである。

【図 14】 第 2 の実施例で作製した試料の断面図である。

【図 15】 第 2 の実施例で作製した試料の積層構造の成長温度と X 線ロッキングカーブのサテライトピークの半値幅との関係を示すグラフである。

【図 16】 第 2 の実施例で作製した試料の積層構造の X 線ロッキングカーブを示すグラフである。

【図 17】 第 3 の実施例で作製した試料の断面図である。

【図 18】 第 3 の実施例で作製した試料の InGaAs 歪量子井戸層の In 組成比と厚さ、及び基板の主面の面方位を示す図表である。

【図 19】 第 3 の実施例の試料 A～F の PL スペクトルを示すグラフである。

【図 20】 第 3 の実施例の試料 G～L の PL スペクトルを示すグラフであ

る。

【図 2 1】 第 4 の実施例で作製した試料の断面図である。

【図 2 2】 第 4 の実施例で作製した試料の基板の主面の面方位、歪量子井戸層の In 組成比と厚さ、EL 強度、EL スペクトルの半値幅、及び遮断周波数を示す図表である。

【図 2 3】 第 4 の実施例で作製した試料の規格化 EL スペクトルを示すグラフである。

【図 2 4】 歪量子井戸層の In 組成比と遮断周波数との関係を示すグラフである。

【符号の説明】

- 1 p 型 GaAs 仮基板
- 2 p 型 AlGaAs 高濃度層
- 3 p 型 AlGaAs 低濃度層
- 4 支持基板
- 5 p 型 AlGaAs バッファ層
- 6 p 型 AlGaAs 下部クラッド層
- 7 p 型 AlGaAs 下部キャリア閉込層
- 8 InGaAs 歪量子井戸層
- 9 n 型 AlGaAs 上部キャリア閉込層
- 10 n 型 AlGaAs 上部クラッド層
- 11 n 型 AlGaAs 電流拡散層
- 12 n 型 GaAs コンタクト層
- 15 n 側電極
- 16 p 側電極
- 20、30、40 GaAs 基板
- 21、31、41 GaAs バッファ層
- 22、34、44 InGaAs 歪量子井戸層
- 23 GaAs 障壁層
- 32、36、42、46 AlGaAs クラッド層

33、35、43、45 AlGaAs キャリア閉込層

37 GaAs キャップ層

47 AlGaAs 電流拡散層

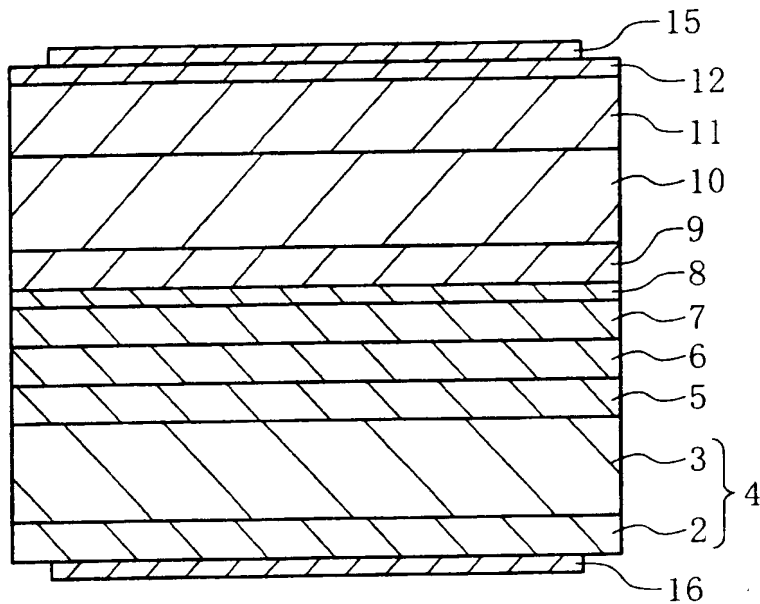
48 GaAs コンタクト層

49 上側電極

50 下側電極

【書類名】 図面

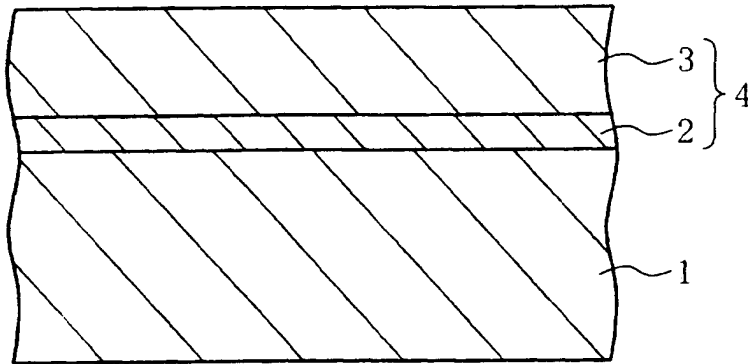
【図 1】



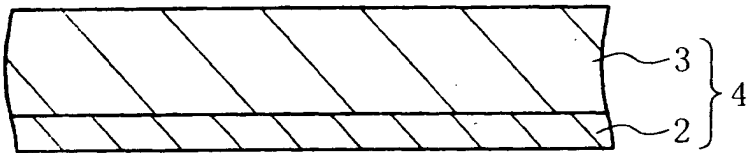
- 5: バッファ層
- 6: 下部クラッド層
- 7: 下部キャリア閉込層
- 8: 歪量子井戸層
- 9: 上部キャリア閉込層
- 10: 上部クラッド層
- 11: 電流拡散層
- 12: コンタクト層
- 15: n側電極
- 16: p側電極

【図 2】

(A)

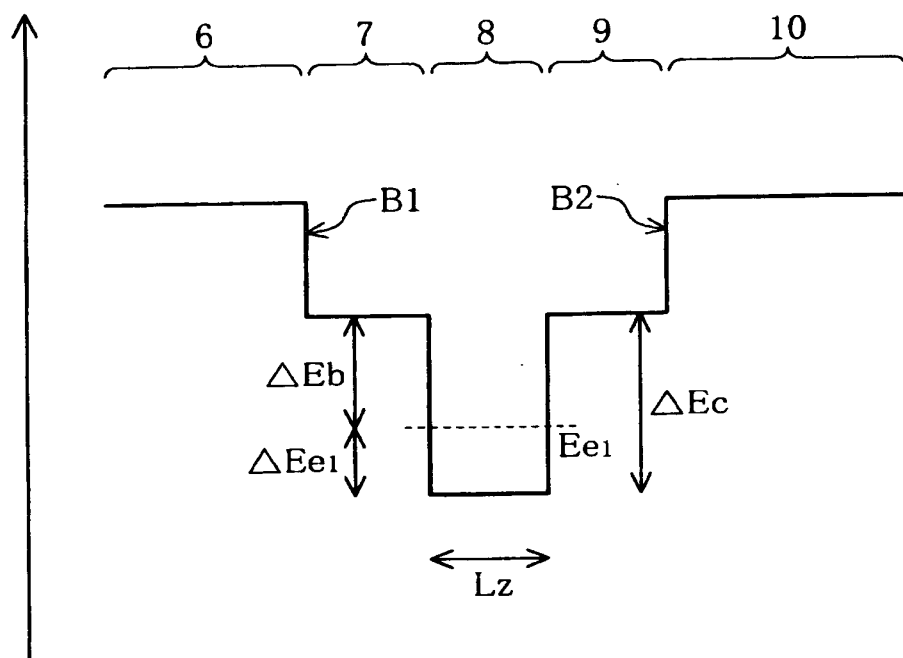


(B)

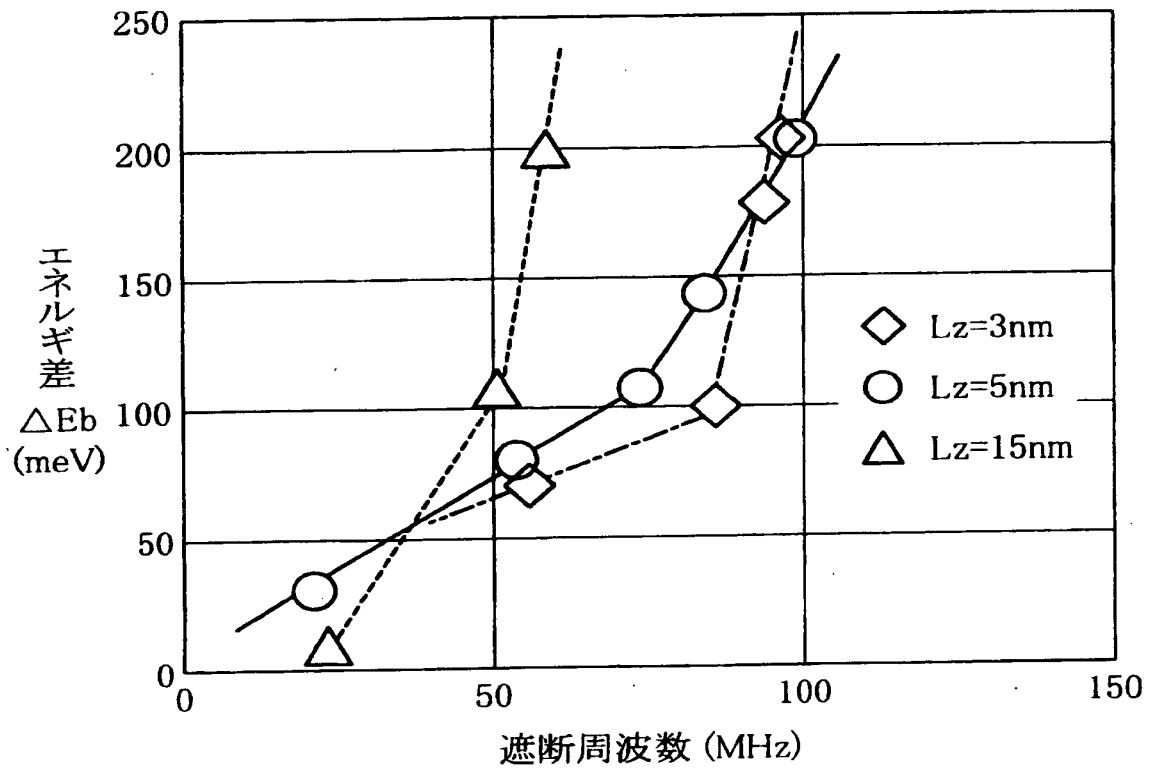


- 1: GaAs 仮基板
- 2: p-AlGaAs 高濃度層
- 3: p-AlGaAs 低濃度層
- 4: 支持基板

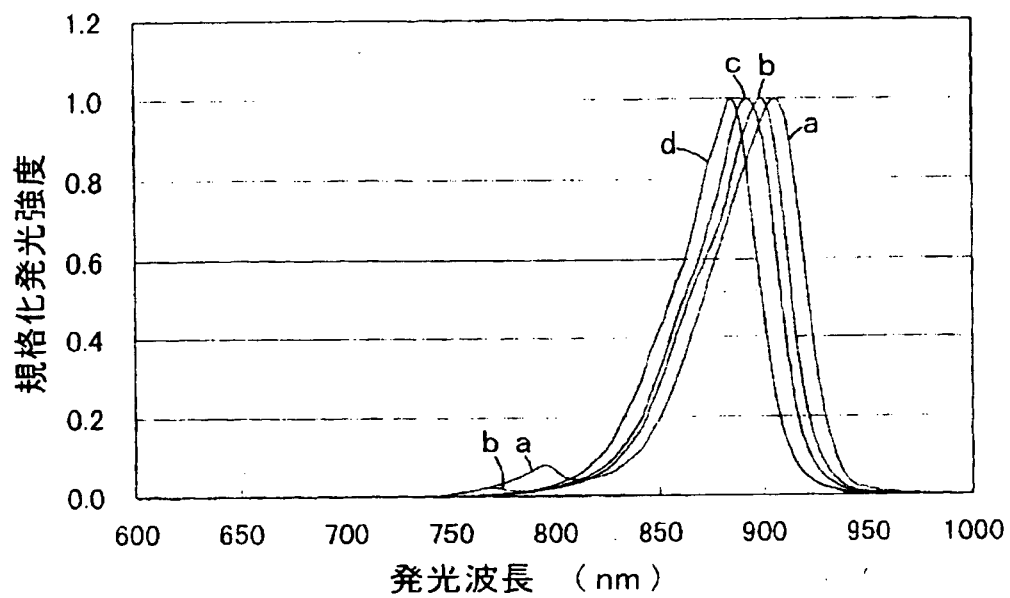
【図 3】



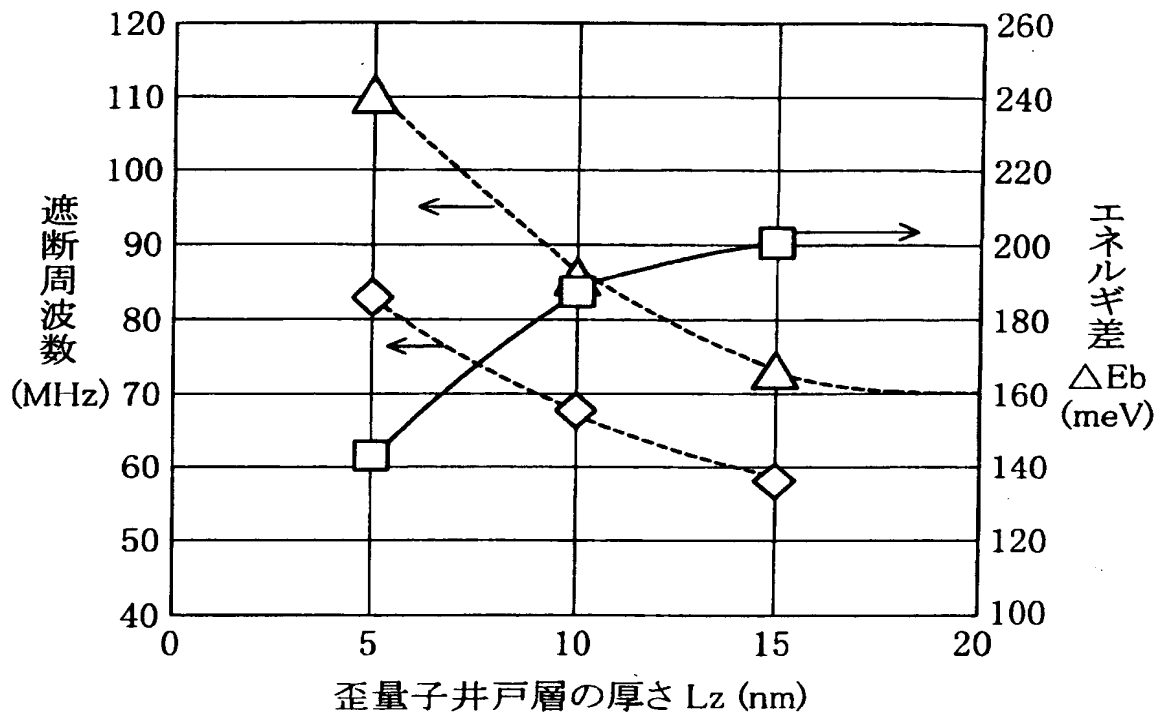
【図 4】



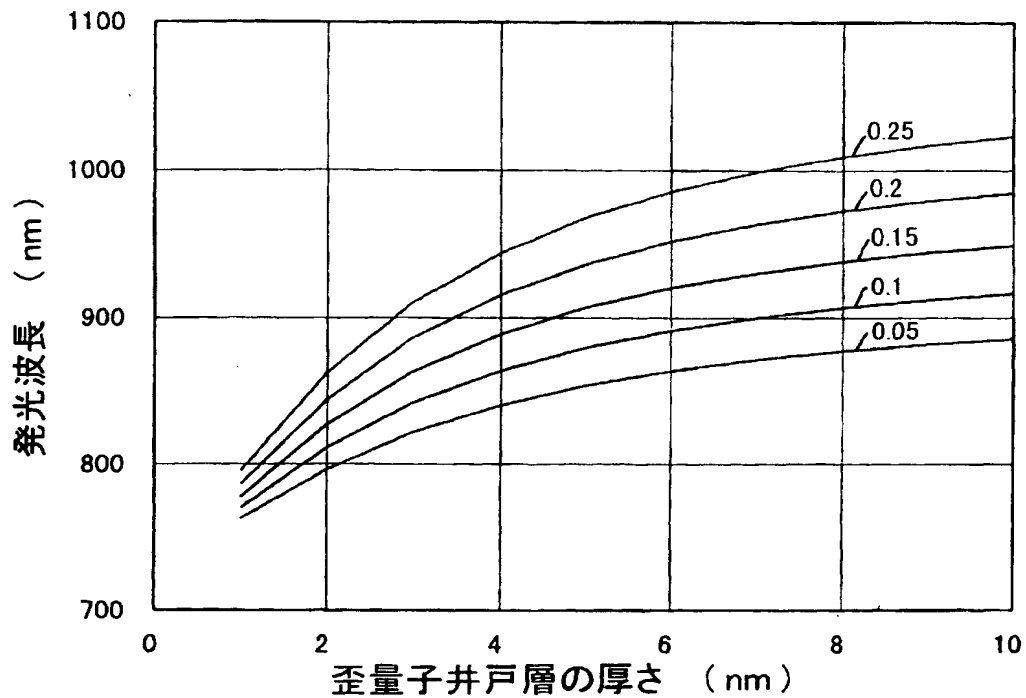
【図 5】



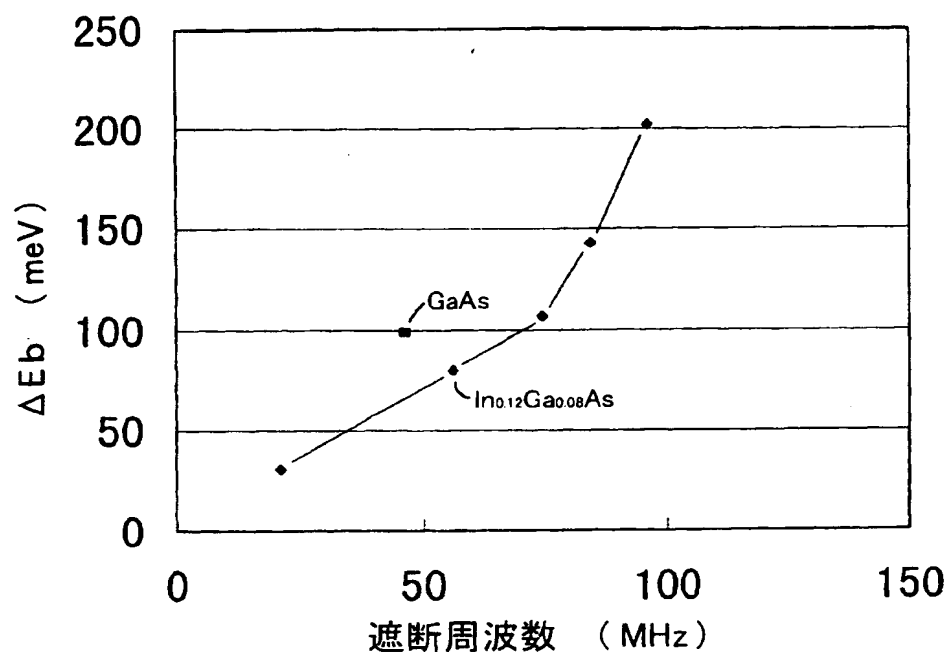
【図 6】



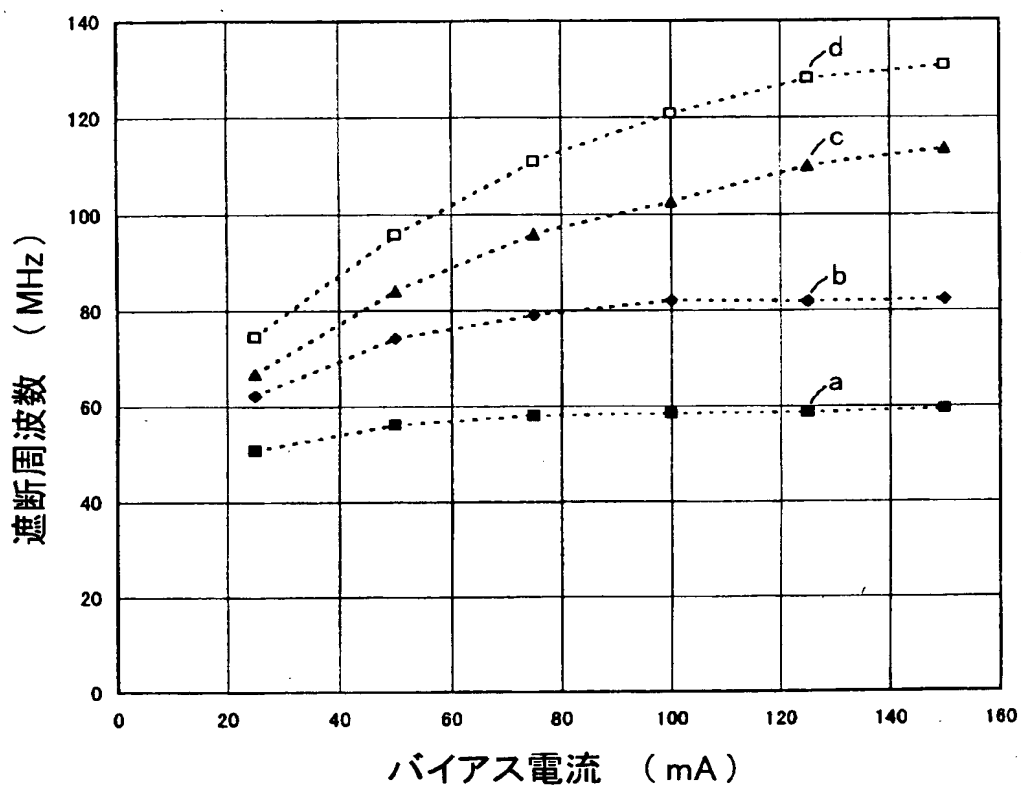
【図 7】



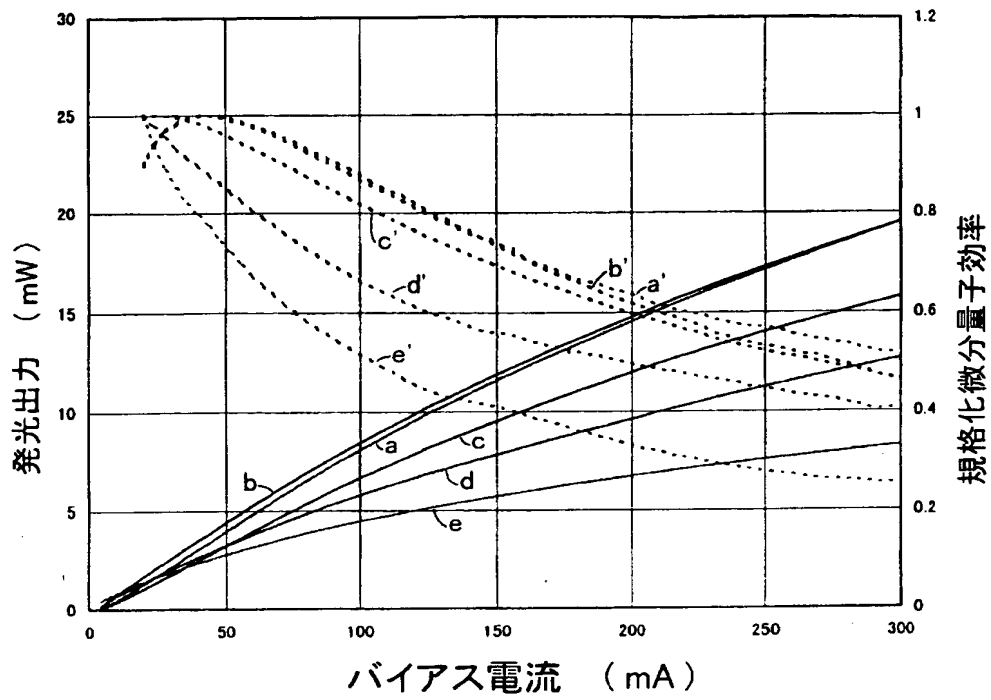
【図 8】



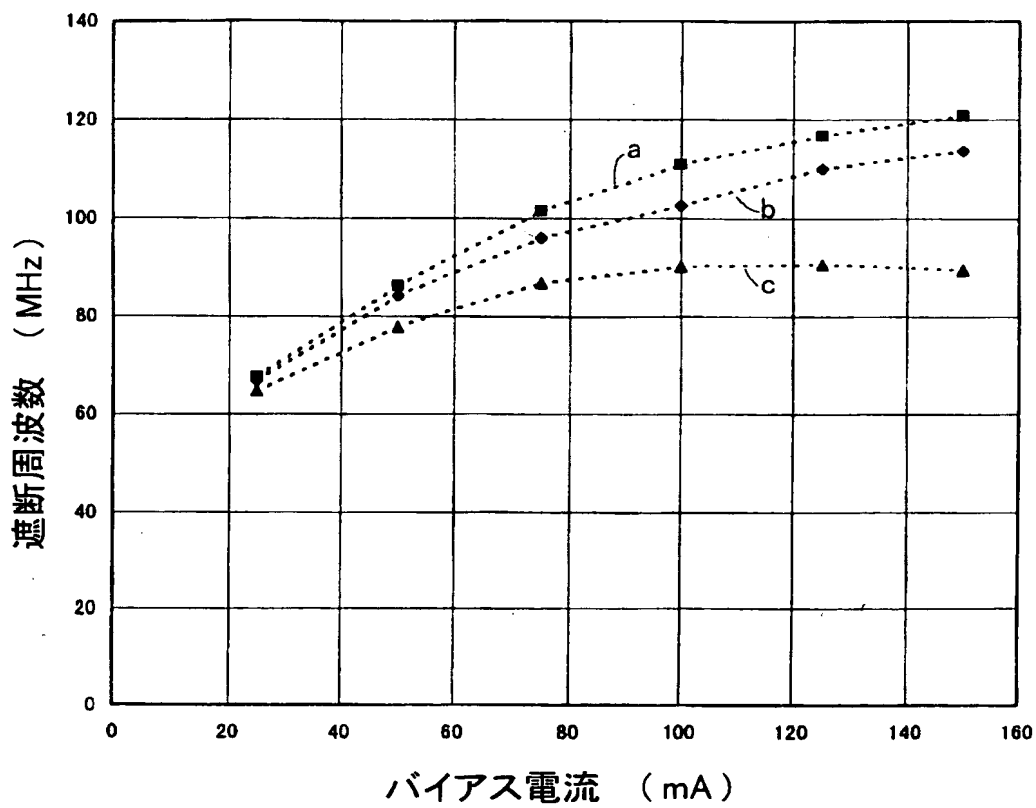
【図 9】



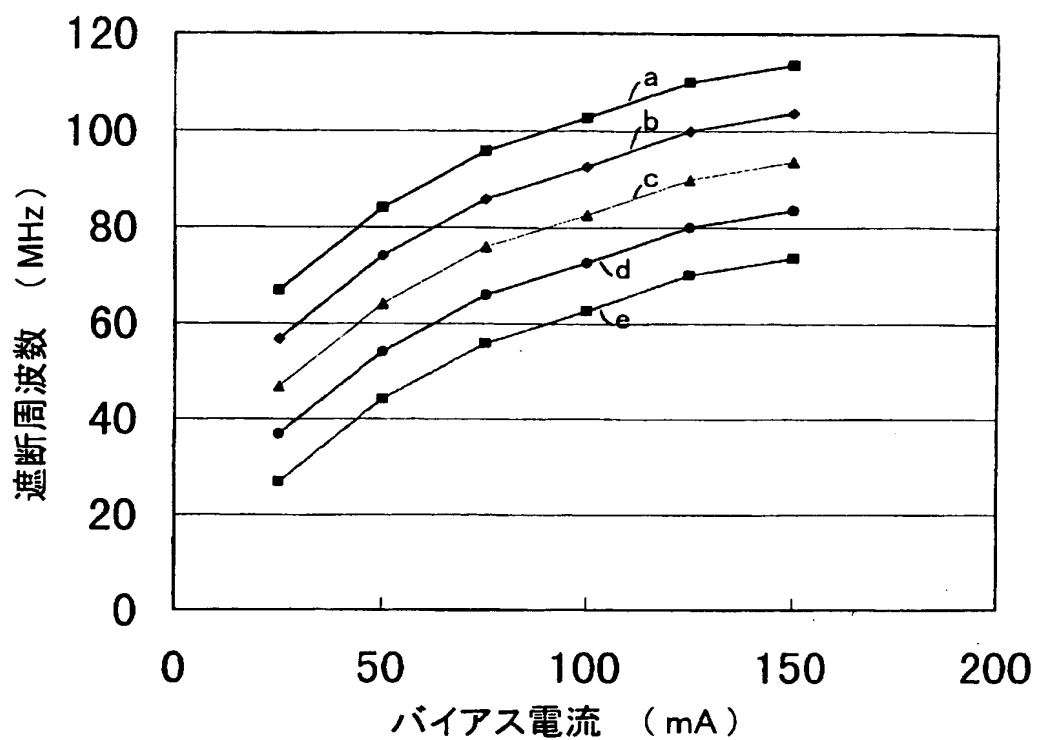
【図 10】



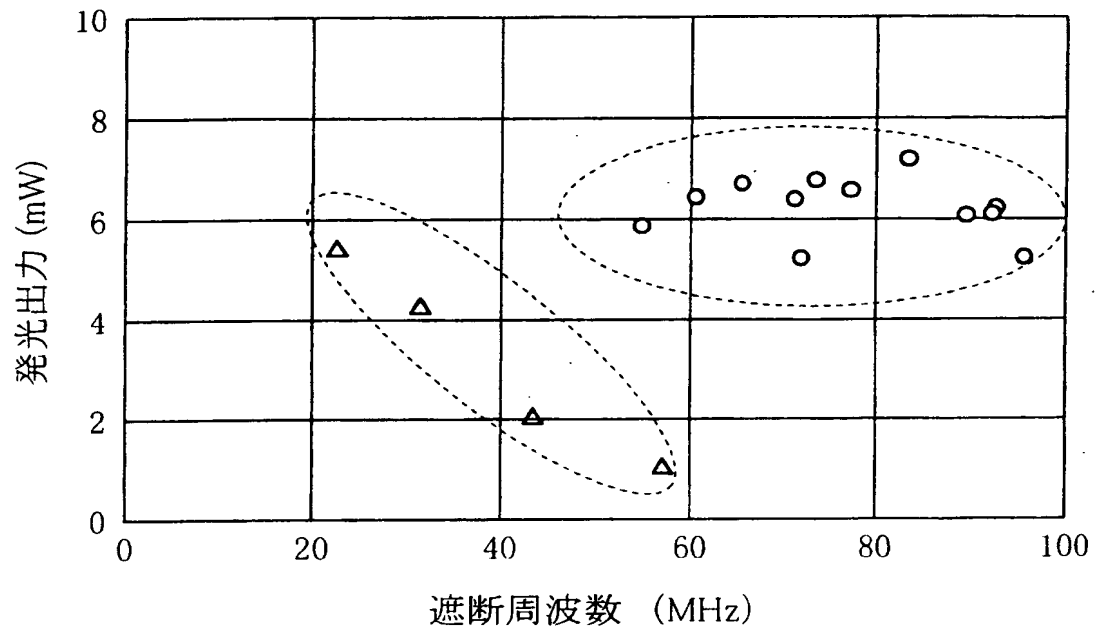
【図 11】



【図 12】

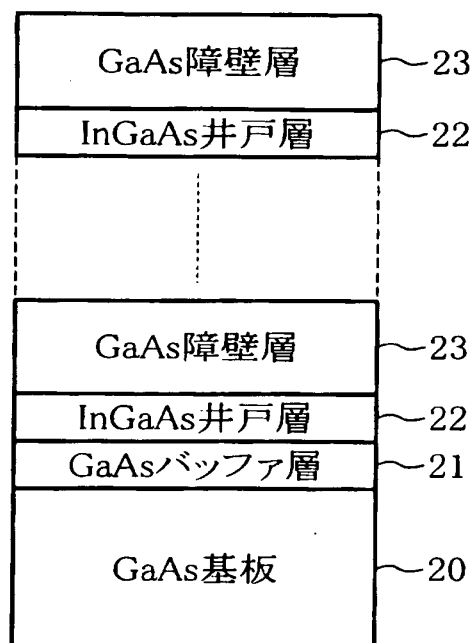


【図 13】

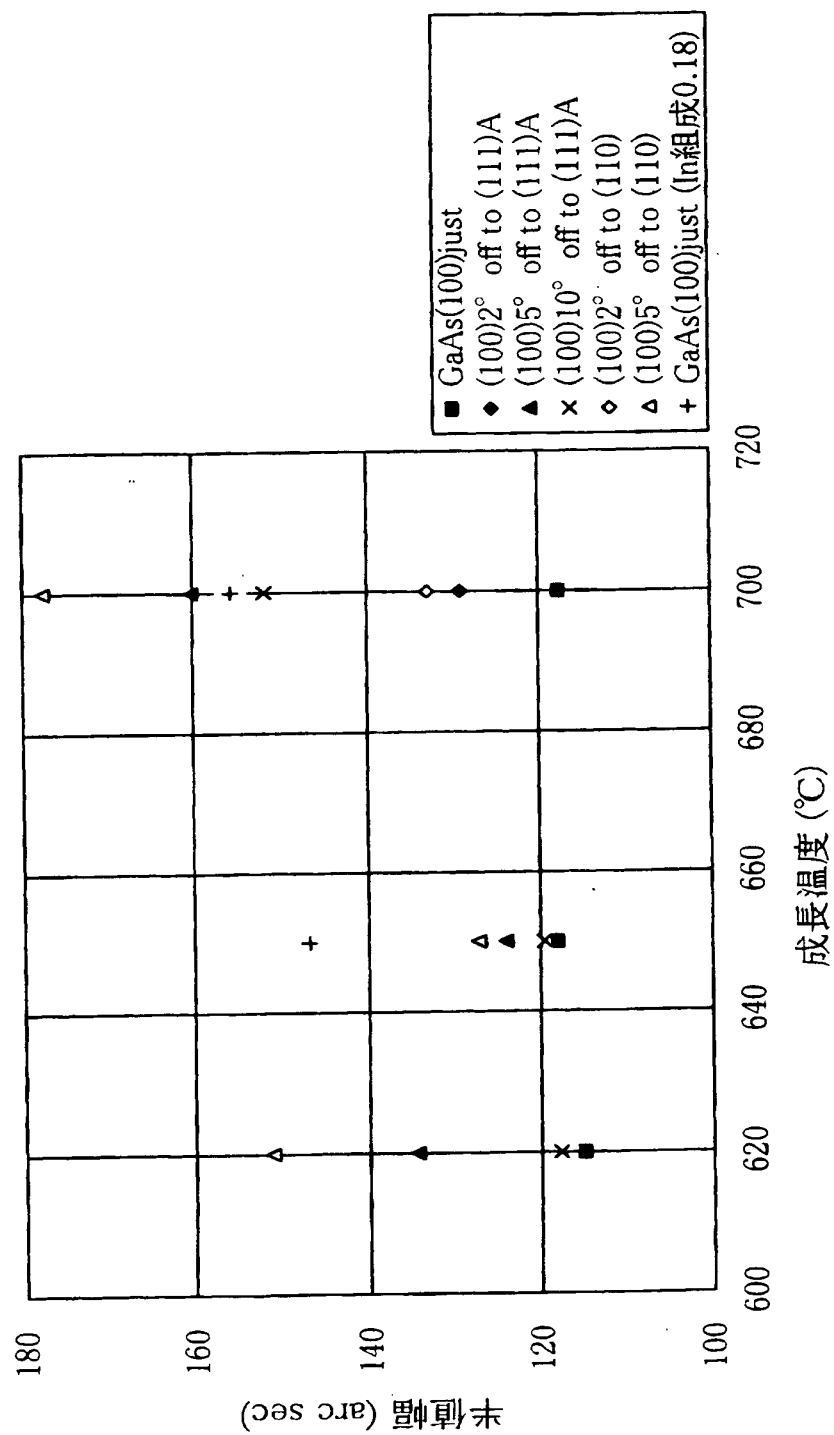


【図 14】

第2の実施例

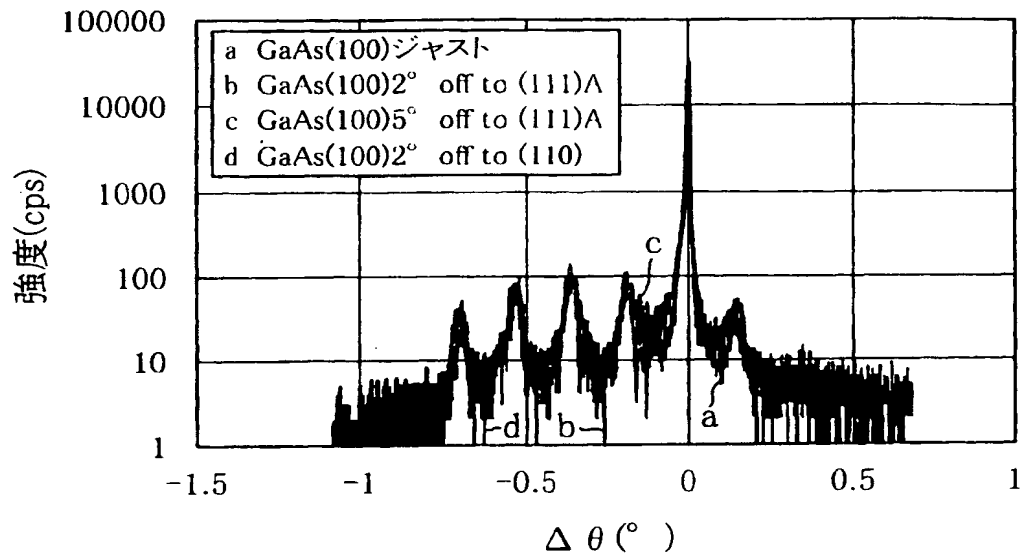


【図 15】



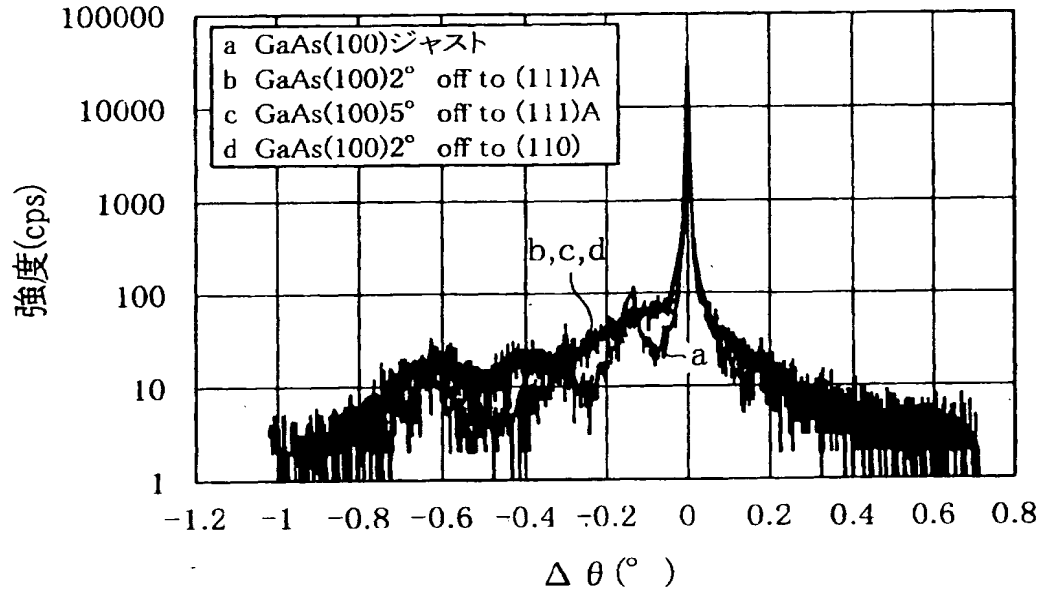
【図16】

(A)



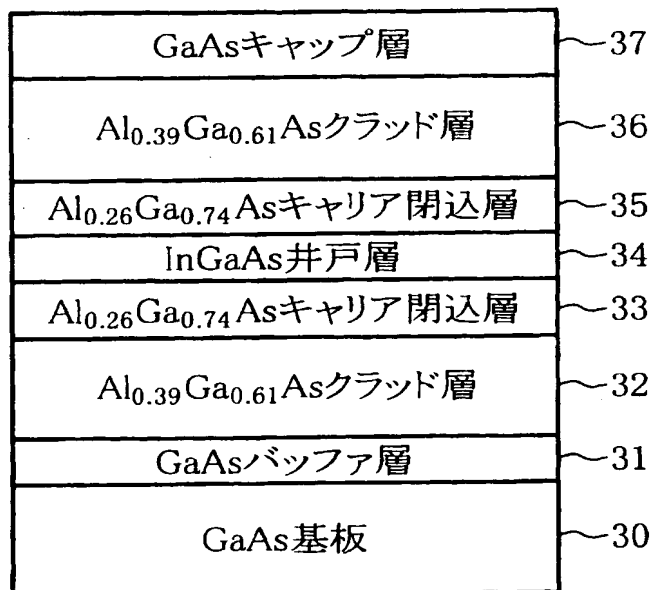
(B)

サンプルIのXRC



【図 17】

第3の実施例

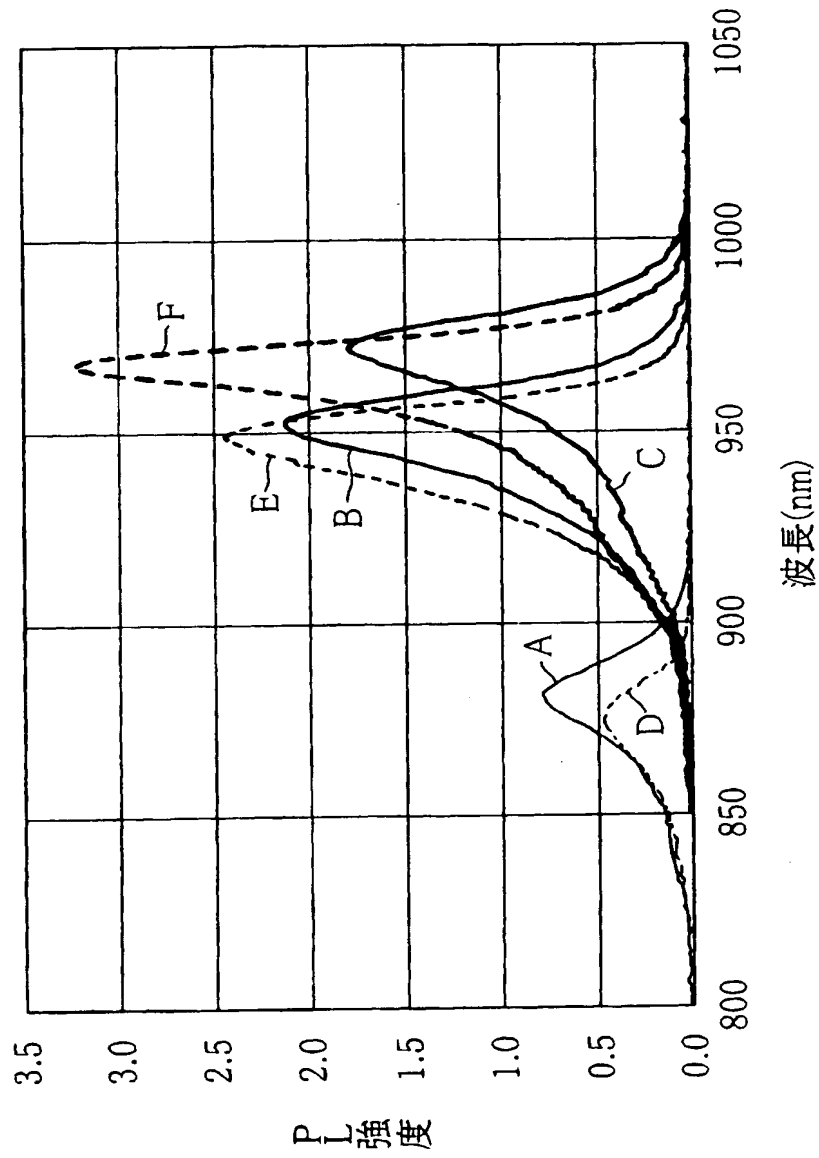


【図18】

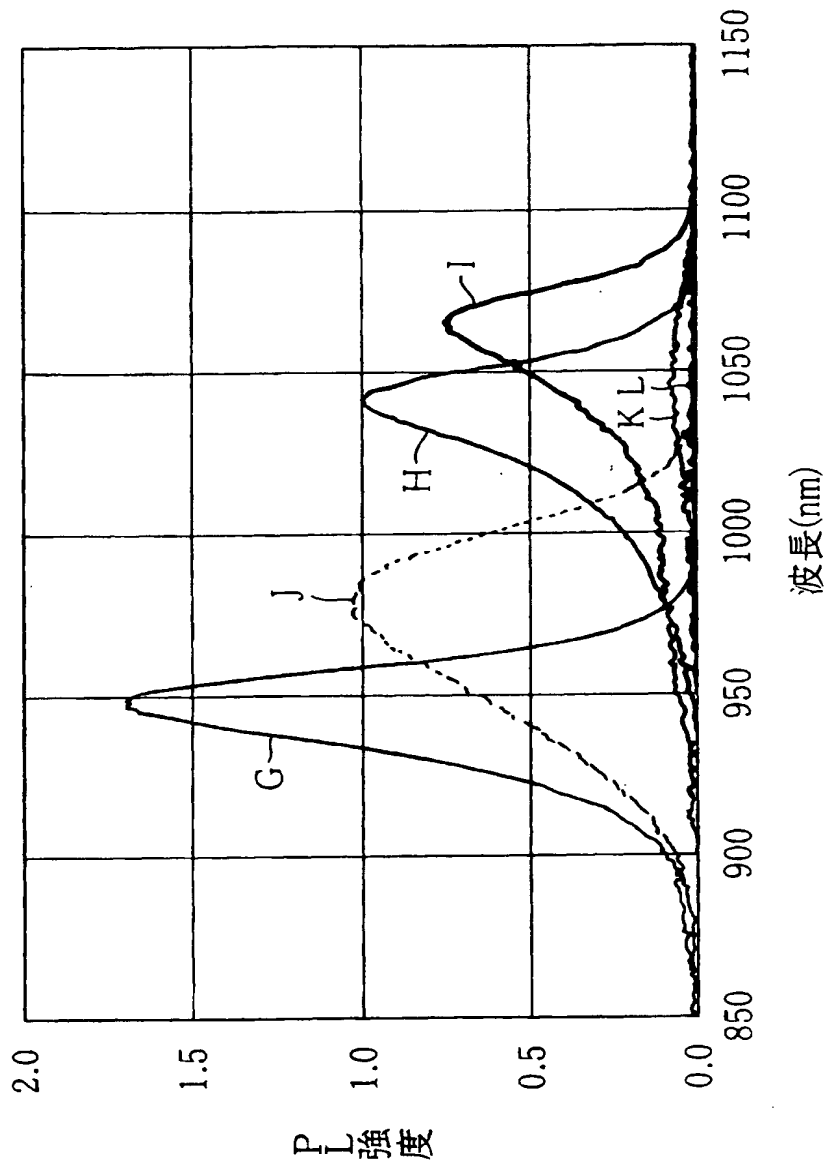
第3の実施例

試料	InGaAs量子井戸層		基板
	In組成比	厚さ (nm)	
A	0.12	5	GaAs(100)ジャスト
B	0.12	10	GaAs(100)ジャスト
C	0.12	15	GaAs(100)ジャスト
D	0.12	5	GaAs(100)5° off to (111)A
E	0.12	10	GaAs(100)5° off to (111)A
F	0.12	15	GaAs(100)5° off to (111)A
G	0.18	5	GaAs(100)ジャスト
H	0.18	10	GaAs(100)ジャスト
I	0.18	15	GaAs(100)ジャスト
J	0.18	5	GaAs(100)5° off to (111)A
K	0.18	10	GaAs(100)5° off to (111)A
L	0.18	15	GaAs(100)5° off to (111)A

【図 19】

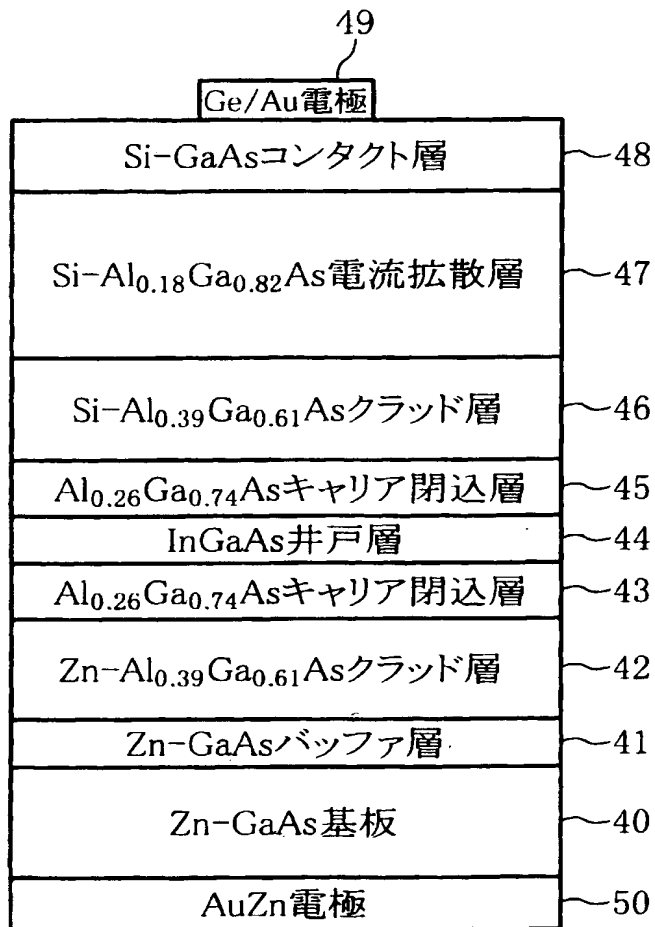


【図 20】



【図 21】

第4の実施例

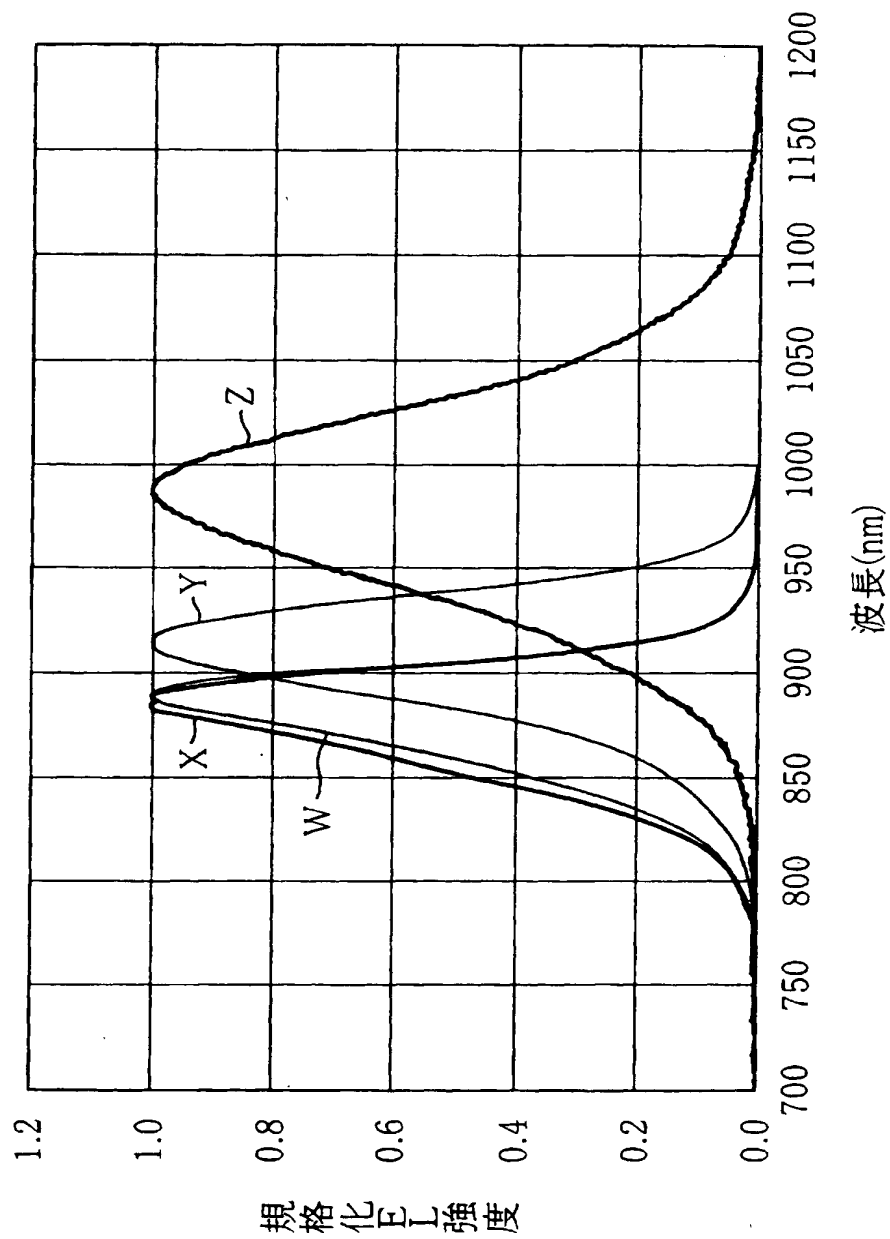


【図 22】

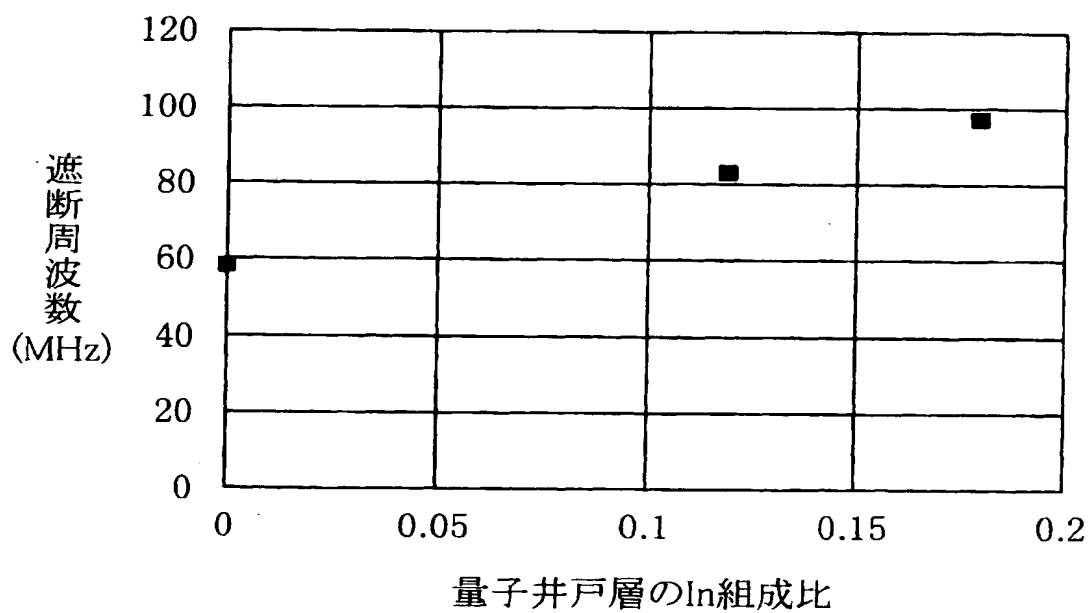
第4の実施例

試料	基板	InGaAs量子井戸層		EL強度(mW)	ELスペクトルの半値幅(nm)	遮断周波数(MHz)
		In組成比	厚さ(nm)			
W	GaAs(100)ジャスト	0.12	5	2.2	46.3	81.9
X	GaAs(100)5° off to (111)A	0.12	5	2.1	57.6	79.0
Y	GaAs(100)ジャスト	0.25	3	2.0	56.8	105.1
Z	GaAs(100)5° off to (111)A	0.25	3	1.3	99.9	112.9

【図 23】



【図 24】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 シリコンを用いたフォトダイオードの受光感度が高い赤外波長領域の光の発光に適し、かつ発光出力の低下を伴うことなく遮断周波数の向上を図ることが可能な半導体発光装置を提供する。

【解決手段】 III-V 族化合物半導体からなる支持基板の主面が、 (100) 面、または (100) 面からの傾斜角度が 2° 以下の面である。支持基板の主面上に発光積層構造が形成されている。発光積層構造は、 In を含む III-V 族混晶半導体からなる量子井戸層、量子井戸層を挟み、量子井戸層よりもバンドギャップの大きな一対のキャリア閉込層、この 3 層を挟み、キャリア閉込層よりもバンドギャップの大きな一対のクラッド層とを含む。キャリア閉込層の伝導帯下端のエネルギー準位と、量子井戸層内の電子の基底準位との差が 100 meV 以上になるように、量子井戸層とキャリア閉込層の材料、及び量子井戸層の厚さが選択されている。

【選択図】 図 1

特願 2 0 0 2 - 3 0 8 1 7 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 2 3 0 3]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 8 日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都目黒区中目黒 2 丁目 9 番 1 3 号

氏 名

スタンレー電気株式会社